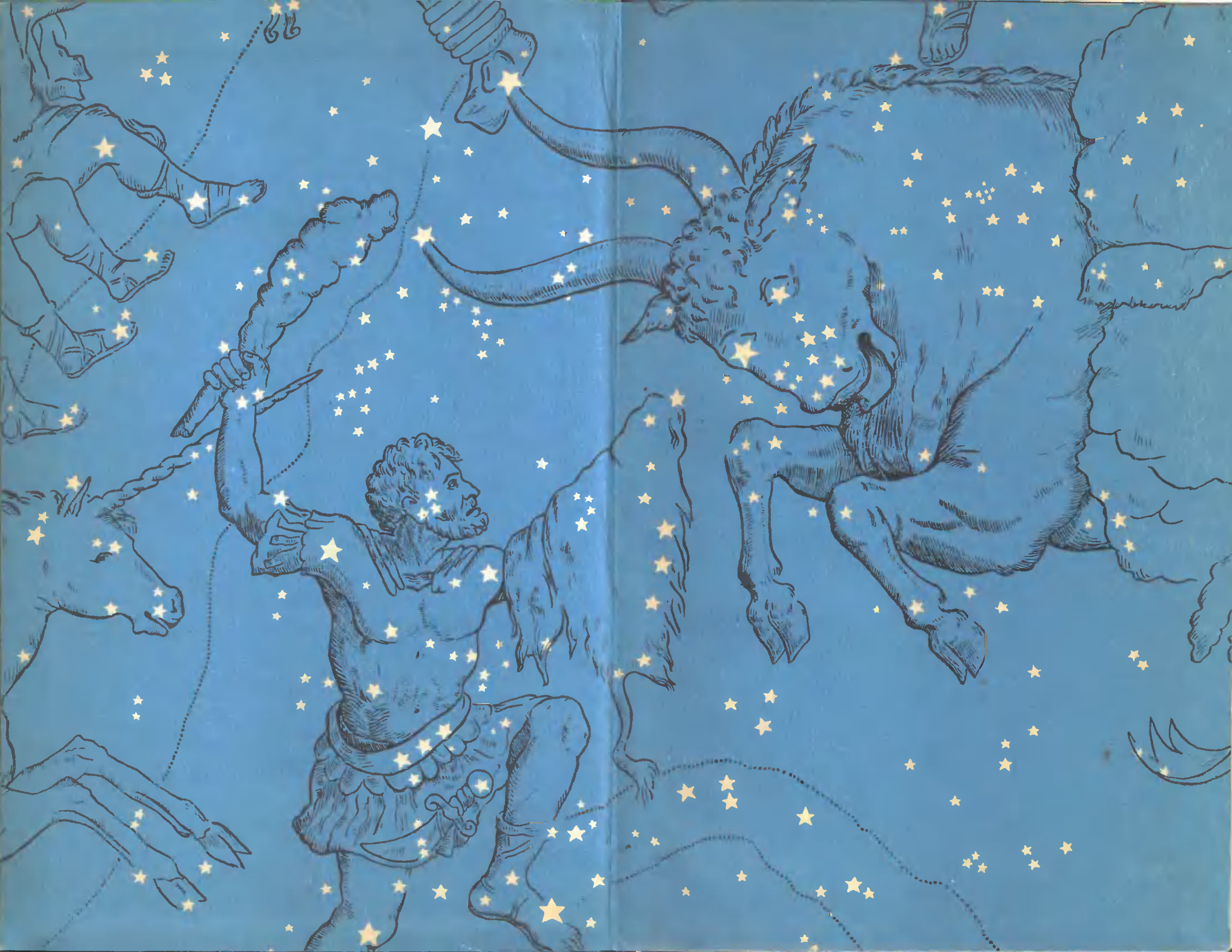


И. И. ПОПОВ, К. Л. БАЕВ,
Б. А. ВОРОНИНОВ-ВЕЛЬЯМИНОВ,
Р. В. КУНИЦКИЙ



АСТРОНОМИЯ

УЧПЕДГИЗ
1958



П. И. ПОПОВ, К. Л. БАЕВ,
Б. А. ВОРОНЦОВ-ВЕЛЬЯМИНОВ, Р. В. КУНИЦКИЙ

АСТРОНОМИЯ

УЧЕБНИК
ДЛЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ ФАКУЛЬТЕТОВ
ПЕДАГОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ

Под общей редакцией
П. И. ПОПОВА

ИЗДАНИЕ ЧЕТВЕРТОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ

Допущено
Министерством высшего образования СССР
в качестве учебника
для физико-математических факультетов
педагогических институтов

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР

МОСКВА * 1958

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЙ К ПРЕДЫДУЩИМ ИЗДАНИЯМ

Будущий учитель должен получить достаточно глубокое и широкое освещение вопросов по предмету, который ему предстоит преподавать в школе. Вот почему мы считаем, что для педагогических институтов в качестве учебника должен использоваться достаточно обширный курс общей астрономии, который ориентировал бы студентов в достижениях и методах современной астрономии, в ее обширных важнейших практических применениях наравне с другими областями наук, лежащих в основе нашего строительства. Сюда входят и идейно-воспитательные задачи, особенно при подготовке учителя астрономии для формирования мировоззрения советской молодежи, для борьбы с идеалистическими влияниями, с остатками суеверий и предрассудков.

Работа по подготовке третьего, как и предыдущих изданий, велась в том же составе авторов и также была организована при кафедре астрономии Московского государственного педагогического института имени В. И. Ленина.

Перед сдачей в печать рукописи третьего издания учебника коллектив авторов лишился своего товарища по работе — проф. К. Л. Баева, скончавшегося 24 марта 1953 г., бывшего одним из инициаторов создания данного учебника.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ЧЕТВЕРТОМУ ИЗДАНИЮ

При подготовке к третьему изданию учебник подвергся значительной переработке соответственно письменным рецензиям и отзывам, а также принимая во внимание новые открытия и установленные факты в астрономической науке. Он был допущен Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для физико-математических факультетов педагогических институтов, был переведен на украинский, на румынский и другие языки. Кроме того, он издается с некоторыми дополнениями в Эстонской ССР в качестве общего курса астрономии.

Пересматривая все содержание и изложение учебника для четвертого издания, авторы имели в виду сделать учебник более компактным, произведя некоторые сокращения второстепенных деталей, а также за счет материала, изучаемого в смежных дисциплинах, улучшая самое изложение, устраняя повторения. Отдельные параграфы написаны заново в свете новых данных науки. При этом имелись в виду задачи идейного воспитания и политехнического обучения. Несколько сокращен описательный материал с учетом того, что в настоящее время издается много научно-популярной литературы и усиливается внимание к самостоятельной работе студентов.

Учебник после третьего издания подвергся общественному просмотру и обсуждению на объединенном заседании учебно-методической секции Центрального совета Всесоюзного астрономо-геодезического общества и астрономической секции Московского его отделения по докладом члена-корреспондента Академии наук СССР П. П. Паренаго и председателя астрономической секции П. И. Бакулпна. Результаты обсуждения также учтены авторами. Общее построение учебника, одобренное при указанном обсуждении, сохранено и в настоящем издании, исправленном и в отдельных частях пере-

работанном. С благодарностью приняты авторами присланные замечания и пожелания, высказанные преподающими общий курс астрономии проф. К. А. Куликовым, Эйнасто, О. В. Голубевой и др.

Работать над настоящим изданием пришлось уже трем авторам, причем пересмотр глав, авторство которых принадлежало К. Л. Баеву, приняли на себя Р. В. Куницкий — гл. VI и Б. А. Воронцов-Вельяминов — гл. IX.

Таким образом, между авторами работа в четвертом издании распределена следующим образом (по главам и параграфам):

П. И. Попов — I, II, III, IV, X, XIV (§ 224).

К. Л. Баев — VIII.

К. Л. Баев и Б. А. Воронцов-Вельяминов — IX.

К. Л. Баев и Р. В. Куницкий — VI.

Б. А. Воронцов-Вельяминов — VII, XI (§ 155, 162—179), XII (§ 189—202), XIII (§ 208, 209, 211, 212), XIV (§ 213—223).

Р. В. Куницкий — V, XI (§ 153, 154, 156—161), XII (§ 180—188), XIII (§ 203—207, 210).

Приложения (таблицы) — Р. В. Куницкий и П. И. Попов.

Указатели литературы по астрономии, имен и предметов — С. А. Шорыгин.

Вопросы и задачи авторы не помещали в учебнике, как и в предыдущих изданиях, имея в виду наличие «Сборника задач и упражнений по астрономии» Б. А. Воронцова-Вельяминова, а также «Практикума по астрономии в педагогических институтах» П. И. Попова и Н. Я. Бугославской.

Все замечания по настоящему изданию авторы примут с большой благодарностью и просят направлять их по адресу: Москва, И-18, 3-й проезд Марьиной рощи, 41, Учпедгиз, редакция физики.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Предмет астрономии и ее значение. Современная астрономия относится к числу физико-математических наук. Она изучает небесные тела и Землю как одно из них. Само слово «астрономия» происходит от греческих слов: «астрон» — светило и «номос» — закон. Главнейшей задачей астрономии в прежнее время и было изучение движений небесных тел и законов, управляющих этими движениями. Астрономия стала развиваться в тесной связи с развитием математики и механики. В наше время астрономия, помимо этого, изучает форму, размеры и массу небесных тел, их природу, строение, физическое состояние, химический состав, их происхождение и развитие. В современном ее состоянии астрономия тесно связана в особенности с физикой и химией. Она опирается на достижения этих наук и со своей стороны содействует их успехам, поскольку на Солнце, звездах и туманностях исследуется вещество в особых условиях температуры, давления и пр. И в своих методах астрономы теперь используют главным образом спектральный анализ, фотометрию и фотографию.

По методам исследования астрономия имеет и особенности. Если химики и физики могут производить эксперименты в своих лабораториях, создавая искусственно те или иные условия, то астрономы в изучении небесных тел располагают лишь возможностью *наблюдать* их и не в состоянии пока что-либо изменить в процессах и явлениях, происходящих на небесных телах. Притом наблюдаемые явления часто не дают нам непосредственно знания действительно происходящего. Например, непосредственные наблюдения не указывают нам на движение Земли, и вопрос решается путем сопоставления с другими явлениями. Поэтому имеет особое значение надлежащее толкование результатов наблюдений, теоретическое объяснение их.

Астрономия с самого своего возникновения в незапамятные времена имела большое практическое значение, давая приемы и методы ориентировки на Земле, определения времени, служа делу мореплавания. Нам и теперь передаются сигналы точного времени из астрономических обсерваторий по широкополосной радиосети. Еще более точные передачи радиосигналов времени произ-

водятся для научных и производственных нужд. И в наше время точные и детальные географические карты составляются на основе астрономических наблюдений. Тесно связана с астрономией в ее практических применениях *геодезия* — наука, занимающаяся определением фигуры и размеров Земли и точными измерениями на местности, играющими большую роль при осуществлении различных народнохозяйственных мероприятий по грандиозным планам мирного строительства нашей страны. Астрономические методы используются также и при исследовании недр Земли средствами *гравиметрии* — науки об измерении силы тяжести на поверхности Земли и о ее изменениях в разных местах, дающих возможность применить эти исследования к разведке полезных ископаемых. О том, какое значение астрономия имеет в авиации, свидетельствуют слова Героя Советского Союза И. Т. Спирина, флагманского штурмана советской экспедиции на Северный полюс: «Ни компас, ни гироскоп, ни радио не могли дать полной уверенности в работе в условиях больших широт. Единственно точной и неизменно безотказной была воздушная астрономия. Она выручала нас в труднейшие моменты и вела точно к намеченной цели» (И. Т. С п и р и н, Исторический рейс).

Совершенно исключительную роль играла астрономия на протяжении всей своей долгой истории в развитии мировоззрений, в борьбе с религиозным, по выражению Маркса, «превратным мирознанием». Такую же роль она продолжает играть и в настоящее время как одна из научных основ самого передового диалектико-материалистического мировоззрения, целиком противоположного реакционному, идеалистическому мировоззрению, поддерживаемому отживающим строем капиталистических стран. Астрономия, как и другие науки, является ареной идеологической и политической борьбы. Некоторые ученые капиталистических стран, извращая подлинно научные выводы в интересах господствующих классов, стремятся стереть принципиальное различие между наукой и религией, подменить материалистическую науку мистикой. Советские астрономы, руководствуясь теорией марксизма-ленинизма, разоблачают эти извращения, успешно добиваются новых результатов в области знаний об окружающей Вселенной, чтобы поставить их на службу трудящимся, на службу народу, строящему коммунизм.

§ 2. Краткий очерк истории астрономии. Корни астрономии нисходят к глубокой древности. Энгельс, говоря о последовательном развитии отдельных отраслей естествознания и устанавливая обусловленность развития науки производством, отмечал астрономию как одну из первых наук в процессе их возникновения: «Сперва *астрономия*, которая уже из-за времен года абсолютно необходима для пастушеских и земледельческих народов. Астрономия может развиваться только при помощи *математики*. Следовательно, приходилось заниматься и последней. — Далее, на известной ступени развития земледелия и в известных странах (поднимание воды

для орошения в Египте), а в особенности вместе с возникновением городов, крупных построек и развитием ремесла развилась и *механика*. Вскоре она становится необходимой также для *судоходства* и *военного дела*... Итак, уже с самого начала возникновения и развитие наук обусловлено производством» (Ф. Э н г е л ь с, *Диалектика природы*, 1955, стр. 145).

Уже в самые отдаленные от нас эпохи истории человечества мы находим некоторый круг астрономических сведений. Первобытный человек примечал отдельные яркие звезды или группы звезд (созвездия) и по их положениям, по появлению вновь на небе каких-либо из них старался угадать наступление времени года, благоприятного для его охоты или для других способов добывания средств к существованию. Смена дня и ночи, времен года, изменение вида ночного неба регулировали определенным образом смену полевых работ первобытного земледельца. Мореплавание, необходимость определять свое положение и направление на море вызывала потребность более тщательно изучать небо и небесные явления.

Из китайских летописей мы узнаем, что видимое движение Солнца и Луны и периодическая повторяемость затмений были уже известны там за 2000 лет до начала нашей эры. Новейшие исследования с несомненностью устанавливают, что у египетских (на берегах Нила) и у вавилонских (в плодородной Месопотамской долине) астрономов имелся запас наблюдений и определенная система астрономических знаний. Египетские жрецы знали довольно хорошо продолжительность истинного года. Их солнечный календарь послужил для построения юлианского календаря. Вавилонские астрономы производили систематические наблюдения над небесными светилами, могли вычислять сроки наступления новолуний, составлять лунные календари, предсказывать затмения. Особенно нужно отметить наблюдения планет, умение определять их положение на небе, периоды их обращений.

С открытием планет связано возникновение так называемой *астрологии*. Эта ложная наука приписывала семи планетам, т. е. блуждающим светилам — Солнцу, Луне, Меркурию, Венере, Марсу, Юпитеру и Сатурну, — чудодейственное влияние на судьбы людей. Исходя из взаимного расположения планет и их положений на небе относительно созвездий, составляли так называемые *гороскопы*, якобы определявшие всю будущую судьбу человека и даже целого государства. Астрология стала особенно процветать в средние века, но мы видим ее возрождение и в современных капиталистических странах, где господствующий строй способствует распространению религиозных суеверий, всякого рода знахарства и мракобесия в интересах эксплуатации трудящихся масс путем обмана их и подавления всего прогрессивного. Там издаются астрологические журналы, организуются общества астрологов, группирующие около себя реакционные темные силы.

У вавилонян существовали еще весьма наивные воззрения на то, что представляет собой окружающий мир. По их представле-

нию, Земля имела форму выпуклого острова, окруженного водами. Воды, находящиеся внизу, отделялись от вод, находящихся наверху, небесной твердью, на которой укреплены звезды. Древняя вавилонская легенда о происхождении мира явилась источником заимствования для известного библейского сказания о сотворении мира, принятого христианством.

У древних греков астрономия получила еще большее развитие. Природные условия — удобное для плавания Средиземное море с изрезанными берегами, обилие цветущих островов — способствовали развитию торговли и мореплавания. Во время своих плаваний и путешествий древние греки знакомились с накопленными другими древними народами сведениями о небесных явлениях. Они и сами производили астрономические наблюдения, вырабатывали методы наблюдений, составляли каталоги звезд.

В учениях передовых греческих философов боги-миротворители уже не фигурируют. По их представлениям, Вселенная и Земля произошли от некоторого первичного «элемента». Одни считали таким элементом воду, а другие — воздух. Живший в конце VI в. до н. э. Гераклит выдвинул замечательный принцип вечной изменчивости материи. Ему принадлежит известное изречение: «все течет». Он учил о вечном обмене веществ между Землей и небом.

Известный математик того же века Пифагор, проводивший значительную часть своей жизни в путешествиях, первый высказал мысль о шарообразности Земли: Земля — сфера, подобная самой себе во всех направлениях; она не имеет ни верха, ни низа. Пифагор также обратил внимание на то, что Солнце совершает полный оборот в течение года по эклиптике в направлении, противоположном суточному вращению звездного неба, которое представлялось сферой, окружающей Землю.

Аристотель (IV в. до н. э.), имевший большое влияние и на последующие времена, разграничивал «земное» и «небесное». Земля, по его представлениям, есть мир тленный, где происходит постоянный круговорот — рождение и смерть, произрастание и увядание; небо, наоборот, усеяно светилами, состоящими из одного эфира — нетленного элемента; все светила являются поэтому вечными и совершенными. Вселенная имеет сферическую форму. Все небесные движения совершенны, т. е. совершаются равномерно по кругам согласно принципу пифагорейцев. Аристотель представлял себе планеты прикрепленными к определенным хрустальным сферам, которые вращаются вокруг неподвижной Земли.

У Аристотеля имеются убедительные доказательства шарообразности Земли. Одним из них было изменение вида звездного неба при передвижении наблюдателя по земной поверхности: в южных странах появляются новые созвездия, невидимые на севере; чем дальше к северу, тем больше видно незаходящих звезд. Второе доказательство Аристотеля основано на наблюдениях лунных затмений: тень Земли на диске Луны всегда ограничена дугой круга. Из того, что все тела при падении стремятся к центру Земли, по

мнению Аристотеля, следует, что Земля должна иметь шаровидную форму. Под конец жизни Аристотель был обвинен в безбожии и вынужден был бежать из Афин. Так боролась с новаторами и людьми науки господствующая религия еще в те далекие времена. Заметим, что учение Аристотеля, будучи прогрессивным для своего времени, заключало идеалистические черты. В эпоху феодализма католическая церковь, извращая философию Аристотеля в соответствии с догмами христианского богословия, превратила ее в оплот своей идеологии и сделала знаменем реакции в эпоху великого социального переворота, связанного с переходом от устаревшего феодального строя к капитализму. Реакционные идеологи старались ухватиться за идеалистические, метафизические стороны учения Аристотеля. «Схоластика и поповщина взяли мертвое у Аристотеля, а не *живое*» (В. И. Ленин, Философские тетради, 1947, стр. 304).

Среди греческих естествоиспытателей, занимавшихся астрономией, нашлись и такие, которые высказывали мысли о движении самой Земли. Вот что сообщает знаменитый математик древности Архимед (IV—III вв. до н. э.): «По представлению некоторых астрономов, мир имеет вид шара, центр которого совпадает с центром Земли, а радиус равен длине прямой, соединяющей центры Земли и Солнца. Но Аристарх Самосский в своих «Предположениях», написанных им против астрономов, отвергая это представление, приходит к заключению, что мир гораздо больших размеров, чем только что указано. Он полагает, что неподвижные звезды и Солнце не меняют своих мест в пространстве, что Земля движется по окружности около Солнца, находящегося в ее центре, и что центр шара неподвижных звезд совпадает с центром Солнца». Аристарх тоже был обвинен в безбожии и вынужден был бежать из Афин.

Все дальнейшие успехи греческих астрономов сводятся лишь к согласованию накопившихся наблюдений над движениями планет с принятой ими геоцентрической системой (Земля — неподвижный центр Вселенной). В этом отношении особенно выделилась так называемая александрийская школа (в городе Александрии, основанном Александром Македонским на севере Африки). Астрономические наблюдения стали производиться там регулярно, при помощи угломерных инструментов. Инструменты были примитивные, методы несовершенные. На основе накопленных таким образом наблюдений крупнейший древнегреческий астроном Гиппарх (II в. до н. э.) составил звездный каталог, содержащий положения свыше 1000 звезд, подразделенных им на шесть звездных величин. Им же введено определение положения точки на земной поверхности при помощи географических широты и долготы, открыто явление предварения равноденствий (прецессии) и др.

Для объяснения видимых движений планет, которые древним представлялись весьма запутанными, греческие астрономы создали чисто геометрическую теорию так называемых эпициклов. Алек-

сандрийский астроном Клавдий Птолемей (II в. н. э.) в его знаменитом сочинении «Альмагест» (арабское название, у древних греков называлось «Мегале синтаксис», т. е. «Великое построение») подытожил все тогдашние астрономические сведения и теории. Это сочинение дает стройную теорию планетных движений, но исходит из неверного принципа неподвижности Земли в центре мира. Появление сочинения Птолемея завершает собой эпоху греческой астрономии.

Глухая пора средневековья надолго затормозила развитие науки. Христианство принесло иные веяния и такие лозунги, как, например: «После Христа нам нет нужды ни в какой науке». Библейская легенда о «сотворении» мира богом в шесть дней признавалась непрекаемым «словом Божиим». Слова легендарного библейского вождя Иисуса Навина: «Стой, Солнце, и не движись, Луна!», принимались за аргумент против движения Земли. Все было задавлено суровым авторитетом церковных установлений и страхом церковного отлучения. Система мира Аристотеля и Птолемея были признаны согласными с библией. Основа христианской религии — догмат искупления (пришествие на Землю бога для спасения людей) гармонировал с представлением об исключительном положении Земли как центра мира.

Всякое выражение какого-либо сомнения и несогласия с этим объявлялось еретическим, жестоко преследовалось папской инквизицией. Известен официальный приговор суда инквизиции (1633), обвинившего Галилея «в ереси как одержимого ложною и противною священному и божественному писанию мыслью, будто Солнце есть центр земной орбиты и не движется от востока к западу, Земля же подвижна и не есть центр Вселенной. По этой причине ты, Галилей, подлежишь исправлениям и наказаниям святыми канонами и другими общими и частными узаконениями, налагаемыми за преступления подобного рода». А какое наказание грозило Галилею, это показал факт сожжения на костре Джордано Бруно (1600), обвиненного в подобном «преступлении».

Некоторый подъем астрономической науки в средние века нужно отметить у арабов, народов Средней Азии и Кавказа. Одним из выдающихся астрономов того времени был Аль-Батани, по прозвищу Альбатегниус (850—929 гг. н. э.). Он заново и точнее определил и проверил многие из результатов Гиппарха и Птолемея. Великому хорезмскому ученому Бируни (972—1048 гг. н. э.) принадлежит определение размеров Земли по углу понижения горизонта с вершины горы. Он же выразил мнение о возможности движения Земли вокруг Солнца. Можно назвать еще Насирэddина Туси (XIII в.), работавшего в Азербайджане, построившего там обсерваторию и составившего звездные таблицы. На территории Советского Союза, вблизи Самарканда, раскопками обнаружена замечательная обсерватория Улуг-бека (XIV—XV вв.), внука известного завоевателя Тамерлана. Соорудив обсерваторию с весьма точными для того времени измерительными инструментами,

Улуг-бек составил новый каталог звезд — первый самостоятельный после Гиппарха и более точный: положения звезд даны в нем не только в градусах, но и в минутах дуги.

Начавшийся быстрый рост хозяйственного развития Европы на рубеже новых веков, жажда наживы и искание новых земель для добычи новых богатств и сбыта товаров, попытки кругосветных плаваний уже не давали возможности удовлетворяться устарелыми теориями древности, приводили к расширению сведений о Земле и наблюдений над небом.

Под влиянием всех этих общественно-экономических факторов астрономия приобретает в XV—XVI вв. важное практическое значение, особенно для кораблевождения и других целей, например для исправления календаря.

Открытие новых земель Колумбом (1492), первое кругосветное путешествие Магеллана (1520—1522) и другие путешествия принесли новое представление о Земле и небе.

У различных ученых начинают намечаться попытки нового подхода к объяснению небесных явлений, пока, наконец, польский астроном Коперник (1473—1543) не сделал великого шага к созданию нового мировоззрения, давшего толчок мощному развитию астрономии как науки. Основой возникновения всех этих новых идей является грандиозный хозяйственный переворот. Приведем характеристику, которую дал этой эпохе Энгельс, связывая с ней начало научного естествознания:

«Современное естествознание,— единственное, о котором может идти речь как о науке, в противоположность гениальным догадкам греков и спорадическим, не имеющим между собою связи исследованиям арабов,— начинается с той грандиозной эпохи, когда бюргерство сломило мощь феодализма, когда на заднем плане борьбы между горожанами и феодальным дворянством показалось мятежное крестьянство, а за ним революционные предшественники современного пролетариата, уже с красным знаменем в руках и с коммунизмом на устах,— с той эпохи, которая создала в Европе крупные монархии, сломила духовную диктатуру папы, воскресила греческую древность и вместе с ней вызвала к жизни высочайшее развитие искусства в новое время, которая разбила границы старого мира и впервые, собственно говоря, открыла землю.

Это была величайшая из революций, какие до тех пор пережила Земля. И естествознание, развивавшееся в атмосфере этой революции, было насквозь революционным, шло рука об руку с пробуждающейся новой философией великих итальянцев, посылая своих мучеников на костры и в темницы... Это было время, нуждавшееся в гигантах и породившее гигантов, гигантов учености, духа и характера. Это было время, которое французы правильно называли Ренессансом¹, протестантская же Европа односторонне и ограниченно — Реформацией.

¹ Возрождением

И у естествознания тоже была тогда своя декларация независимости, появившаяся, правда, не с самого начала, подобно тому, как и Лютер не был первым протестантом. Чем в религиозной области было сожжение Лютером папской буллы, тем в естествознании было великое творение Коперника, в котором он — хотя и робко, после 36-летних колебаний и, так сказать, на смертном одре, — бросил вызов церковному суеверию. С этого времени исследование природы по существу освободилось от религии, хотя окончательное выяснение всех подробностей затянулось до настоящего времени и далеко еще не завершилось во многих головах. Но с тех пор и развитие науки пошло гигантскими шагами, ускоряясь, так сказать, пропорционально квадрату удаления во времени от своего исходного пункта...» (Ф. Э н г е л ь с, Диалектика природы, 1955, стр. 152—153).

Упомянув о великом творении Коперника, Энгельс имел в виду знаменитую книгу Коперника «Об обращениях небесных сфер», появление которой относится к 1543 г., т. е. к году смерти Коперника, и составляет результат многолетних его работ, можно сказать, дело всей его жизни.

В течение последующих столетий окончательно был решен вопрос и о месте Земли в мироздании, и о причине ее движения наряду с другими планетами вокруг Солнца. Кеплер, Галилей и Ньютон (XVII в.) довершили дело Коперника. Дальнейшее сравнительно быстрое развитие астрономии, как и других наук, шло в связи с развитием производительных сил, с расширяющимися практическими запросами капитализма, игравшего тогда прогрессивную роль. Во второй половине XVII в. в ряде стран были построены обсерватории с большими астрономическими трубами и более точными измерительными инструментами. В 1665 г. была основана Парижская обсерватория (главным образом для нужд картографии), в 1676 г. — Гринвичская обсерватория (близ Лондона) для обслуживания морского флота. В России в 1692 г. была устроена в Холмогорах на Северной Двине первая астрономическая обсерватория, а затем организована и оборудована обсерватория в Петербурге при основанной Петром I Академии наук (1725).

У наших предков-славян существовал глубокий интерес к астрономическим явлениям. Об этом свидетельствуют русские летописи и восходящие к более глубокой древности памятники устного народного творчества. Славянские народы имели свой календарь, связанный с наблюдавшимися астрономическими явлениями и сезонными изменениями на Земле. Наблюдая звездное небо, славяне давали созвездиям свои названия: Лось — Большая Медведица, Стожары — Плеяды, Коло — Орион и пр. По ним определялось направление стран света, а по их появлениям и положениям — наступление важных хозяйственных периодов.

В ряде русских летописей мы находим описание таких небесных явлений, как солнечные и лунные затмения, кометы, метеоры и

даже солнечные пятна, наблюдавшиеся простым глазом. В повествовании о полном солнечном затмении 1185 г., описанном в «Слове о полку Игореве», отмечены на Солнце, между прочим, протуберанцы (выступы), которые в XVIII в. были открыты телескопическими наблюдениями.

Сама Земля тогда еще представлялась плоской. Но уже на построенном в XVII в. здании посольского приказа в Москве был вылеплен земной глобус, и этим как бы официально и всенародно утверждалось представление о шарообразности Земли. Всего через несколько лет после первых наблюдений Галилея, впервые построившего телескоп и направившего его в небо, зрительные трубы появились и у нас (в 1614 г.). Когда в 1675 г. отправлялось русское посольство в Китай, оно имело с собой астрономические инструменты для определения географических пунктов.

Деятельность Петра I имела особенно большое значение для развития астрономии и распространения астрономических знаний в России.

Петр I лично весьма интересовался астрономическими наблюдениями, приобретал для этого инструменты. Внимание к астрономии вызывалось потребностями создававшегося тогда морского флота, необходимостью составления географических карт нашей еще малоизведанной обширной страны. В Москве на Сухаревой башне производились астрономические наблюдения при открытой там навигационной школе, где астрономия стала предметом преподавания. Руководил всем этим известный сподвижник Петра I Я. В. Брюс, весьма сведущий в астрономии. С именем Брюса связаны начавшие издаваться ежегодные календари. В них печатались астрономические сведения: время восхода и захода Солнца, фазы Луны, сведения о солнечных и лунных затмениях и пр. В лице Брюса русская наука начала XVIII в. имела не только искусного наблюдателя и организатора первых астрономических обсерваторий, но и конструктора астрономических инструментов. Астрономическая обсерватория Академии наук, хорошо по тому времени оборудованная, сыграла большую роль и в изучении географии России.

Петр I занимался астрономией, был убежденным сторонником гелиоцентрической теории Коперника. По его указанию был переведен на русский язык ряд книг по астрономии, содержащих изложение этой теории. В царствование Елизаветы Петровны усилилось влияние церковников, которые добивались запрещения всех этих книг. Надо сказать, что церковники так же, как на Западе, поддерживали представление о Земле как неподвижном центре мира и объявляли ересью учение о движении Земли. Но в это время на защиту передовой науки решительно выступил гениальный русский ученый М. В. Ломоносов (1711—1765). Его можно назвать с полным правом одним из основоположников русской астрономической науки, сделавшим важнейшие открытия в этой области, как и в ряде других наук.

Развитие естествознания на протяжении XVII—XVIII столетий Энгельс охарактеризовал так: «Первый период нового естествознания заканчивается — в области неорганического мира — Ньютоном. Это период овладения данным материалом. В области математики, механики и астрономии, статистики и динамики он дал великие достижения, особенно благодаря работам Кеплера и Галилея, выводы из которых были сделаны Ньютоном... Природа вообще не представлялась тогда чем-то исторически развивающимся, имеющим свою историю во времени... Революционное на первых порах естествознание оказалось перед насквозь консервативной природой, в которой и теперь все было таким же, как в начале мира, и в которой все должно было оставаться до окончания мира таким же, каким оно было и в начале его... Первая брешь — Кант и Лаплас» (Ф. Энгельс, Диалектика природы, 1955, стр. 153—154).

Речь идет о тех, сыгравших значительную роль в истории мировоззрений гипотезах образования и развития солнечной системы и Земли, первая из которых была высказана немецким философом Кантом (в 1755 г.), а вторая, независимо от него и притом более научно обоснованная, — французским математиком и механиком Лапласом (в 1796 г.). Эти гипотезы впервые внесли в научное мировоззрение идею развития, согласно которой Земля и планеты не появились вдруг в готовом виде, а имеют историю во времени. На очереди стали вопросы о природе небесных тел и об изменениях, происходящих на них. Здесь надо отметить работы М. В. Ломоносова, который уже в середине XVIII в. открыл атмосферу на Венере, исследовал процессы, происходящие в кометах и полярных сияниях, и давал им физические объяснения, предвосхитив, как и во многих других случаях, то, что окончательно устанавливалось исследованиями последующего времени. Благодаря работам Ломоносова о создании отечественных научных кадров во второй половине XVIII в. появляется целый ряд молодых русских астрономов. Среди них надо отметить С. Я. Румовского (1734—1812), заведовавшего академической обсерваторией. Он достаточно точно для того времени определил расстояние от Земли до Солнца и издал первый каталог астрономических пунктов нашей страны.

До XIX в. объектом астрономических исследований являлась главным образом солнечная система, причем звезды служили неподвижным фоном для движений планет. Но уже в конце XVIII в. в результате более точных наблюдений, в особенности производившихся В. Гершелем, построившим большие телескопы, было обнаружено движение Солнца в пространстве, получено в основном представление о строении Млечного Пути, открыта неизвестная дотоле планета, которой дано название Уран. Дальнейшие результаты в изучении окружающего нас звездного мира в первой половине XIX в. получены русским астрономом В. Я. Струве, основателем Пулковской обсерватории (в 1839 г.), завоевавшей своими точными определениями положений звезд мировое признание.

Струве первый определил расстояние до сравнительно близкой к нам звезды Веги в созвездии Лиры. Своими работами Струве значительно продвинул вопрос о строении Млечного Пути и высказал смелую мысль о существовании межзвездной среды, поглощающей свет. Наличие рассеянного вещества в межзвездном пространстве окончательно установлено уже в наше время и играет теперь большую роль в исследовании звездных систем в глубинах Вселенной. Всеми этими работами положено начало звездной астрономии, получившей особенно большое развитие в XX в. и в нашей стране в советское время.

Еще несколько раньше, в 1830 г., Д. М. Перевощиковым была основана астрономическая обсерватория при Московском университете. Своими учебными руководствами и научно-популярными лекциями Перевощиков сильно способствовал распространению астрономических знаний в нашей стране. Особенно быстро астрономия развивалась с середины XIX в. в связи с развитием других отраслей естествознания, в первую очередь физики и химии, в связи с успехами техники на базе развития производительных сил. Вводятся новые методы исследования неба. С этого времени наша отечественная наука в ряде областей астрономии занимает ведущее место (работы Ф. А. Бредихина, А. А. Белопольского, В. К. Цераского, П. К. Штернберга и др.; об этих работах будет сказано в соответствующих главах книги).

Исключительных успехов достигла астрономия за последние десятилетия в нашей стране, где после Великой Октябрьской социалистической революции для развития науки предоставлены неограниченные возможности и где научные исследования приобрели глубокую идейную направленность, основанную на диалектико-материалистическом методе исследования природы. Заботами советской власти в нашей стране создан ряд новых астрономических учреждений и обсерваторий, получивших более совершенное оборудование. В них работают многочисленные коллективы специалистов, готовятся молодые кадры, тогда как в небольшом количестве дореволюционных обсерваторий могли работать только единицы. Возникли оптические и механические производства по изготовлению больших астрономических инструментов, оригинальные и более совершенные конструкции которых разработаны советскими учеными и инженерами.

В настоящее время нет ни одной сколько-нибудь заметной отрасли астрономии, которая не разрабатывалась бы в Советском Союзе. Особенно большое развитие получили исследования переменных звезд, давшие важные результаты в познании природы и эволюции звезд. Создана «служба Солнца» по изучению связи явлений на Солнце с земными явлениями; это имеет особое значение для ряда народнохозяйственных задач. Организована первоклассная «служба времени». Советские астрономы стали независимы в отношении необходимых справочных сведений и таблиц, которые раньше брались из иностранных ежегодников, а теперь составляются и

предвычисляются организованным в системе Академии наук СССР Институтом теоретической астрономии и издаются на несколько лет вперед в виде астрономических ежегодников.

К важнейшим достижениям советской астрономии относятся работы о происхождении Земли и планет, а также о происхождении и эволюции звезд.

Все достижения советской астрономии разбивают пропагандируемые зарубежными учеными-идеалистами «теории» о едином будто бы моменте «творения» всей Вселенной, о конечности ее в пространстве и времени, об исключительности солнечной системы и Земли и пр. — все то, что характеризует упадок буржуазной науки, находящейся на службе отживающего империализма и реакции. Советская астрономия разоблачает эти лженаучные теории. Идейная направленность на основе самой передовой теории марксизма-ленинизма, плановость, коллективность всей работы, связь с народным хозяйством, с народом — все это отличает советскую науку, в том числе и астрономию, и обеспечивает ее невиданный расцвет.

§ 3. Подразделение современной астрономии. Астрономия в современном ее виде является весьма разработанной наукой. Она подразделяется на ряд отдельных дисциплин, которые в то же время тесно связаны между собой. Главнейшие из этих дисциплин следующие:

1. **Астрометрия** изучает методы астрономических измерений, служащих для определения точных положений небесных светил, их взаимных угловых расстояний, угловых диаметров светил и размеров, расположения деталей на них, а также для определения времени, географических координат на земной поверхности и направлений; к этому надо прибавить и методы обработки измерений.

Разделами астрометрии являются: а) *сферическая астрономия*, содержащая математические методы определения видимого расположения светил на небесной сфере, теорию определения точного времени, а также методы освобождения наблюдений от различного рода влияний и погрешностей (преломления лучей света в атмосфере, движений Земли и пр.), б) *практическая астрономия*, занимающаяся описанием измерительных астрономических инструментов, учетом инструментальных и личных ошибок, разработкой методики наблюдений и способов определения времени, координат точек на земной поверхности, азимутов светил и др.

Из практической астрономии выделилась *мореходная астрономия*, а также *авиационная астрономия*.

2. **Небесная механика** изучает движения небесных тел под действием сил притяжения и отталкивания, и в первую очередь — тел солнечной системы, исходя из закона всемирного тяготения, пользуясь математическим анализом.

Та часть небесной механики, в которой рассматривается движение тел солнечной системы под действием одной лишь силы притяжения Солнца, без влияния планет друг на друга (задача

двух тел), получила название *теоретической астрономии*. В область небесной механики входит также теория фигур небесных тел и теория приливов.

3. *Звездная астрономия* занимается исследованием закономерностей в распределении, движениях звезд и межзвездной материи с учетом их физических особенностей, а также изучением строения и развития звездных систем.

4. *Астрофизика* занимает ведущее место в современной астрономии. Она исследует при помощи физических методов строение небесных тел, их физическое состояние, химический состав, процессы, происходящие на них, разрешает вопросы об источниках энергии Солнца и звезд, а также исследует строение межзвездной среды. Проблемы астрофизики, исследующей свойства материи в мировом пространстве, тесно связаны с важнейшими проблемами современной физики.

Астрофизика подразделяется на *практическую*, разрабатывающую методы астрофизических наблюдений, и *теоретическую*, объясняющую результаты наблюдений на основе достижений теоретической физики. За последнее время образовался особый раздел астрономии, тесно связанный с астрофизикой — *радиоастрономия*, в которую входит исследование радиоизлучения небесных тел и межзвездной среды, а также применение методов радиолокации.

5. *Космогония* на основании всех добытых знаний о небесных телах и нашей Земле разрабатывает вопросы об образовании и развитии небесных тел, в частности солнечной системы и Земли.

6. *Космология* изучает общие закономерности строения окружающей нас Вселенной.

Обе последние дисциплины имеют особое значение для формирования правильного материалистического мировоззрения и для борьбы с идеалистическими «теориями» о возникновении небесных тел «из ничего», о конечности Вселенной во времени и пространстве и прочими реакционными измышлениями.

Настоящий курс общей астрономии имеет задачу вооружить будущего учителя знаниями основ астрономической науки в целом. Поэтому он содержит необходимые сведения из всех разделов астрономии, преимущественно же из имеющих наибольшее практическое применение и мировоззренческое значение.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОСНОВЫ СФЕРИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

§ 4. Звездное небо и его видимое суточное вращение. Источником всех наших знаний о природе за пределами Земли и о месте Земли в окружающем мире являются наблюдения. Всякому наблюдателю окружающий мир представляется прежде всего в виде раскинувшегося над ним в безоблачную ночь звездного неба как некоторого шарообразного свода. Это явление кажущееся. На самом деле все светила находятся от нас на самых различных расстояниях, но эти расстояния так велики, что глаз наш не в состоянии установить разницы между ними. Вследствие этого светила и представляются расположенными как бы на одинаковых расстояниях, т. е. на сферической поверхности.

Всматриваясь внимательно в кажущуюся бесчисленность звезд и беспорядочность в расположении их по небу, мы замечаем среди них более яркие, которые не так трудно сосчитать и которые как бы группируются в отдельных областях неба. Еще в глубокой древности наблюдатели стали подмечать некоторые фигуры, образуемые более яркими звездами, и давать тем или иным группам звезд, или созвездиям, особые названия. Вероятно, прежде всего отмечались такие группы звезд, которые резко всего бросались в глаза и появление которых на ночном небе в определенное время года связывалось с хозяйственными условиями. При накоплении наблюдений число различаемых на небе созвездий умножалось, в их названиях можно заметить следы соответствующих эпох с отражением окружающей земной природы, с отражением мифов и мировоззрений тех народов, среди которых они возникали: Большая и Малая Медведица, Лев, Дракон, Большой Пес с Сириусом, Орион, Геркулес, Персей и пр. В «Альмагесте» Птолемея (II в. н. э.) описано 48 созвездий. В настоящее же время все небо разграничено на 88 созвездий. Это число созвездий, их границы и названия фиксированы Международным астрономическим съездом в 1922 г. (см. приложение 9). Под созвездиями мы теперь разумеем не самые группы звезд, а участки, на которые разбито звездное небо и внутри которых расположены звездные группы (см. рис. 192 на стр. 327). Если раньше созвездиям давались названия животных, мифи-

ческих героев, то в последующее время появляются и такие названия, как Компас, Секстант, Часы, Телескоп.

Приступая к изучению астрономии, необходимо ознакомиться непосредственно на звездном небе с созвездиями и приобрести навык в нахождении главнейших из них. Они служат прекрасными ориентирами, так как расположение звезд друг относительно друга остается неизменным и вид каждого созвездия всегда одинаков. В дальнейшем мы будем говорить о движениях звезд в пространстве и о постепенном изменении их взаимного расположения на небе, но вследствие чрезвычайной дальности их расстояний от нас видимые изменения так малы, что они остаются совершенно незаметными для невооруженного глаза не только в течение жизни человека, но большей частью на протяжении тысячелетий. В описаниях древнегреческих наблюдателей упоминаются те же созвездия, которые мы видим на небе и теперь.

Наряду с этим мы наблюдаем и такие светила, которые сравнительно быстро (на протяжении месяцев, недель и даже часов) изменяют свое положение среди других, как Луна, планеты, кометы, а некоторые и мгновенно пролетают на глазах, как «падающие звезды», или метеоры. В этих случаях созвездия нам служат как бы фоном, и мы ориентируемся по ним при описании этих более или менее быстро протекающих явлений.

Умение находить на небе созвездия и отдельные яркие звезды помогает также и ориентироваться на Земле. Все рассматриваемые дальше в курсе вопросы станут вполне ясными, если изучение их будет опираться на конкретные представления, полученные каждым его собственными наблюдениями. В особенности необходимо это учителю астрономии в школе, который не только должен понять явления, но уметь хорошо их разъяснить и показать учащимся.

Первые же наблюдения звездного неба приводят нас к тому заключению, что весь небосвод с видимыми на нем светилами вращается как одно целое в течение суток в направлении с востока на запад. При этом в северной части небосвода можно заметить звезду, которая для наблюдателя в данном месте остается почти неподвижной, все время на одной и той же высоте, показывая тем самым направление оси вращения. Звезду эту называли *Полярной*.

Направление видимого суточного вращения неба происходит с востока на запад или «по стрелке часов». Это в том случае, если наблюдатель стоит лицом к югу. Если же стоять лицом к северу и смотреть на Полярную и ближайšie к ней звезды, то суточное вращение происходит «против стрелки часов»: сверху Полярной звезды — с востока на запад, или справа налево, а снизу Полярной — слева направо. Вообще же вся небесная сфера вращается в одном направлении: если бы смотреть извне ее со стороны Полярной звезды — «по стрелке часов».

Суточное вращение звездного неба — явление кажущееся. Истинная причина этого явления, как мы теперь хорошо знаем, заключается в действительном вращении самой Земли в обратном направлении.

Картину видимого суточного вращения хорошо представляет фотография, полученная неподвижным аппаратом, направленным на область звездного неба, окружающую Полярную звезду (рис. 1). Если экспозиция продолжается несколько часов, то каждая звезда описывает некоторую дугу, соответствующую углу поворота около центральной точки, называемой полюсом мира. Полярная звезда находится вблизи полюса мира, отстоя от него на угловом расстоянии около 1° .



Рис. 1. Фотография околополярной области неба, снятой неподвижной камерой

Найти на небе Полярную звезду легче всего по созвездию Большой Медведицы, наиболее приметные звезды которого составляют фигуру ковша из семи звезд (рис. 2). Беря на небе направление по двум крайним звездам «ковша» в сторону его отверстия, мы и встретим Полярную звезду примерно такой же яркости. Отличить ее нетрудно, так как в этой области неба другой звезды такой же яркости нет. Полярная звезда входит в созвездие Малой Медведицы, находясь в конце «рукоятки ее ковша». Все созвездие Малой Медведицы состоит из более слабых звезд, и в них также можно подметить фигуру из семи звезд, обращенную своим «ковшом» меньшего размера в сторону

Большой Медведицы. По другую сторону Полярной заметим третье созвездие — Кассиопею, приметное своими более яркими пятью звездами, составляющими ломаную линию, напоминающую букву М.

Если взять на небе направление, перпендикулярное к направлению от Большой Медведицы к Кассиопее, то по одну сторону от Полярной на несколько большем расстоянии от нее мы увидим одну из самых ярких звезд северного неба — Капеллу, входящую в состав созвездия Возничего, с другой стороны почти на таком же расстоянии и такой же яркости — звезду Вегу в небольшом созвездии Лиры.

Все эти пять созвездий на широте Москвы круглый год не заходят, находясь в области неба, окружающей полюс мира. Между ними располагается несколько более слабых созвездий, среди которых следует заметить Дракона, охватывающего своим полукольцом Малую Медведицу, а между ним и Кассиопеей — созвездие Цефей. По другую сторону Кассиопеи — заметное своими более

яркими звездами и довольно обширное созвездие Персей. Через эти созвездия проходит Млечный Путь.

В южной стороне неба мы увидим звезды восходящие и заходящие, а потому здесь в разное время года после захода Солнца перед нами выступают разные созвездия, из которых можно отметить: осенью — Лебедь, Орел (соседние с Лирой) и Пегас; зимой — Телец с кучкой звезд — Плеядами, Близнецы, Орион, Большой Пес и Малый Пес (эта область неба особенно богата яркими звездами); весной — Лев и Дева; летом — Волопас, Северная Корона,

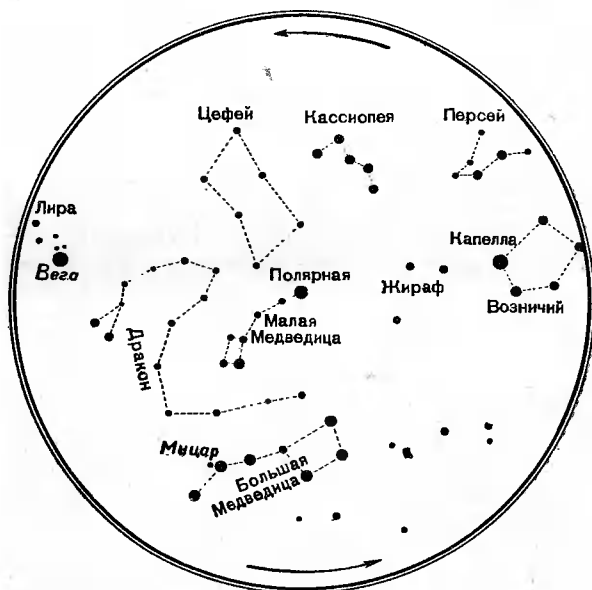


Рис. 2. Околополярные созвездия

Геркулес, Скорпион, Стрелец. В приложениях помещены звездные карты, по которым можно ознакомиться с видом и взаимным расположением всех указанных здесь созвездий и находить их затем на небе. Там же приведен и список всех созвездий.

Звезды по их блеску делятся на звездные величины. Яркие звезды относят к первой величине (Альдебаран в Тельце), менее яркие — ко второй (Полярная, звезды «ковша» Большой Медведицы, кроме δ), еще менее яркие — к третьей и т. д., так что блеск каждой следующей звездной величины в $2\frac{1}{2}$ раза слабее предыдущей. Самые слабые звезды, еще видимые простым глазом, относятся к шестой звездной величине. В телескоп же наблюдаются звезды седьмой, восьмой и более слабых звездных величин. Звезды промежуточного блеска обозначаются дробными числами: например,

звездная величина 2,6 означает, что данная звезда слабее второй звездной величины и несколько ближе по блеску к третьей величине; звезда 2,8 величины — еще ближе по яркости к третьей величине и т. д. Вообще же следует заметить, что чем большим числом выражается звездная величина, тем звезда слабее по своему блеску. Есть звезды ярче первой звездной величины в $2^{1/2}$ раза, их относят к 0-й звездной величине. Еще ярче звезды минус первой звездной величины, минус второй и т. д. Например, Сириус в созвездии Большого Пса относится к —1,6 звездной величины.

На всем небе видно простым глазом около 5000 звезд, из них первой величины 20, второй — 51. Внутри каждого созвездия отдельные звезды обозначаются греческими буквами по алфавиту соответственно их блеску за некоторыми исключениями (в созвездии Близнецов звезда β ярче звезды α).

§ 5. Небесная сфера. При астрономических наблюдениях прежде всего ставится задача определить более или менее точно положение светила в момент наблюдения. Небесные светила мы видим в различных от нас направлениях, и их видимое взаимное расположение мы определяем углами между этими направлениями или соответствующими дугами больших кругов на воображаемой сфере, из центра которой все эти направления исходят. При этом размеры сферы не имеют значения: она может быть любого радиуса¹.

Воображаемую шаровую поверхность произвольного радиуса, служащую для измерения видимых положений небесных светил, называют небесной сферой.

Если в центре такой сферы поместить глаз наблюдателя, то всякому направлению от глаза к звезде на небесном своде будет соответствовать определенная точка как проекция звезды на небесной сфере. Моделью небесной сферы может служить небесный глобус с нанесенными на нем в соответствующих местах звездами. Надо заметить, что на глобусе созвездия изобразятся на выпуклой стороне как бы зеркально повернутыми сравнительно с тем, как видим их на вогнутом небесном своде.

Для определения положений светил на небесной сфере установлены основные линии и точки ее, по отношению к которым производятся измерения. Где бы на поверхности Земли ни находился наблюдатель, он всегда может, пользуясь отвесом, определить вертикальное направление, а по нему и горизонтальную плоскость. Приблизженно вертикальное направление можно считать направлением к центру Земли из данной точки ее поверхности.

Точка пересечения небесной сферы с вертикальной прямой, проходящей через центр небесной сферы, называется *зенитом* (Z). Диаметрально противоположная точка небесной сферы называется *надиром* (Z').

Плоскость, проходящая через центр небесной сферы перпендикулярно к вертикальной прямой, называется *горизонтальной*

¹ Как и транспортир для измерения углов в геометрии.

плоскостью. Эта плоскость образует при пересечении с небесной сферой линию окружности большого круга, называемую *математическим*, или *истинным горизонтом* (SWNE на рис. 3).

От истинного, или математического, горизонта следует отличать *видимый*, или *физический*, *горизонт*. Это — граница, до которой наблюдатель может видеть ровную поверхность Земли и которая имеет в общем форму окружности. Следует заметить, что у математического горизонта размеры произвольны, как у небесной сферы. Физический же горизонт имеет определенные размеры. Например, если принять во внимание, что диаметр земного шара около 12 740 км, а рост человека 1,7 м, то дальность видимости горизонта на ровной местности получается около 7 км.

Вторым основным направлением для небесной сферы является то направление, вокруг которого происходит видимое вращение неба. Прямая линия, проходящая через центр сферы и изображающая это направление, называется *осью мира*. А так как в действительности вращается Земля, то ось мира всюду на Земле параллельна оси вращения Земли.

Точки пересечения оси мира с небесной сферой называются *полюсами мира*: один — *северный (P)* над нашим горизонтом (для наблюдателя, находящегося в северном полушарии Земли), другой — *южный (P')*, в противоположной точке сферы, под горизонтом. Иначе можно сказать: северный полюс мира — тот, вокруг которого для наблюдателя в центре сферы, обращенного лицом к полюсу, видимое вращение происходит против часовой стрелки, а обращенного лицом к югу — по стрелке часов.

Плоскость, проходящая через центр небесной сферы перпендикулярно к оси мира, называется *плоскостью небесного экватора*. Образованная при пересечении этой плоскостью небесной сферы окружность большого круга называется *небесным экватором (AEQW)* на рис. 3). Небесный экватор разделяет небесную сферу на два полушария: северное и южное.

Окружность большого круга небесной сферы, проходящего через зенит и полюс мира, называется *небесным меридианом*. Приблизительно он может быть намечен на небесном своде по Полярной звезде. При суточном вращении каждое светило два раза проходит через меридиан. Прохождение светила через меридиан называется его *кульминацией*. Различаются верхняя и нижняя кульминации. В верхней кульминации светило видно нам в своей наивысшей точке над горизонтом. Звезды незаходящие бывают видны и в нижней кульминации. Вообще же для всех звезд верхняя куль-

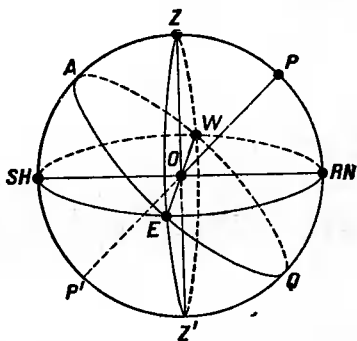


Рис. 3. Основные точки, линии и плоскости небесной сферы

минация есть прохождение через меридиан в той его половине от полюса мира, которая пересекает горизонт в точке юга, а нижняя — в той половине меридиана, которая пересекает горизонт в точке севера. В плоскости меридиана лежат вертикальная линия и ось мира, поэтому плоскость меридиана перпендикулярна и к плоскости горизонта и к плоскости экватора.

Линия пересечения плоскости меридиана с плоскостью горизонта называется *полуденной линией*. Она показывает и направление земного меридиана в данном месте, пересекаясь с линией горизонта в точках севера (N — ближайшей к северному полюсу мира) и юга (S — диаметрально противоположной).

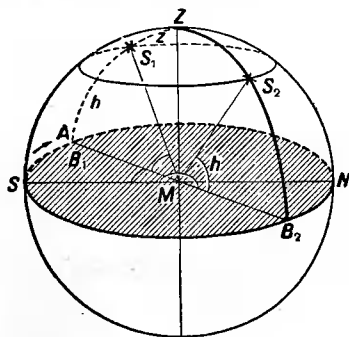


Рис. 4. Горизонтальная система координат

Посередине между ними на горизонте лежат: точка востока (E — направо от наблюдателя, обращенного лицом к северу) и точка запада (W — налево от того же наблюдателя).

Таким образом, положение плоскости небесного меридиана и направление полуденной линии служат для ориентировки на Земле по странам света.

Всякая плоскость, проходящая через вертикальную прямую, называется вертикальной плоскостью. Эта плоскость в пересечении с небесной сферой образует на ней большой круг, называемый *вертикалом*. Зенит является общей точкой всех вертикалов.

Вертикал, лежащий в плоскости, перпендикулярной к плоскости меридиана, называется *первым вертикалом*. Он пересекается с горизонтом в точках востока (E) и запада (W). В этих же точках пересекается с горизонтом и небесный экватор. Очевидно, прямая EW перпендикулярна к полуденной линии.

§ 6. Сферические координаты. Горизонтальная система небесных координат. На сфере положение точки может быть определено двумя угловыми, или сферическими координатами. Для этого надо взять плоскость большого круга, принимаемого за основной, и из центра сферы вообразить к этой плоскости перпендикуляр, дающий в пересечении со сферой точку, называемую полюсом.

В горизонтальной системе координат основной является плоскость математического горизонта, а полюсом — зенит. Первая координата этой системы есть угол между направлением на светило и плоскостью горизонта ($\angle S_1MB_1$ и $\angle S_2MB_2$) (рис. 4). Она называется *высотой*, обозначается буквой h и измеряется дугой вертикала, проходящего через данное светило, от горизонта до светила. Вместо высоты часто употребляется *зенитное расстояние* z , т. е. угол между вертикальным направлением и лучом зрения ($\angle S_1MZ$ или дуга S_1Z). Очевидно, зенитное расстояние является дугой

вертикала, дополняющей высоту до 90° , т. е. $z = 90^\circ - h$; $z + h = 90^\circ$.

Вторая горизонтальная координата есть дуга математического горизонта от точки юга (S) в сторону запада до пересечения горизонта с кругом высоты данного светила, или, что то же, — двугранный угол между плоскостью меридиана и вертикальной плоскостью, проходящей через светило. Эта координата называется *азимутом*, обозначается буквой *A*.

Двумя координатами — высотой (или зенитным расстоянием) и азимутом — вполне определяется положение точки на небесной сфере. Например, $h=0^\circ$ и $A=180^\circ$ соответствуют точке севера, а $z=90^\circ$ и $A=270^\circ$ соответствуют точке востока. Если даны координаты $A=130^\circ$ и $h=40^\circ$, то, отсчитывая от точки юга по горизонту в сторону запада 130° и поднимаясь над горизонтом по вертикальному кругу на 40° , мы приходим в единственную точку северо-западной стороны небесной сферы, имеющую эти координаты.

Для светил, находящихся над горизонтом или под горизонтом, высота изменяется от 0 до $\pm 90^\circ$, а зенитное расстояние — от 0 до 180° . Азимут считается от точки юга по направлению к западу в пределах от 0 до 360° , т. е. по

часовой стрелке, если смотреть от точки зенита¹ (на рис. 6 азимут звезды S_2 больше 180°). Употребляются также азимуты восточный и западный, отсчитываемый каждый от 0 до 180° , иногда западный азимут считается положительным, а восточный — отрицательным, и тогда азимут изменяется в пределах от 0 до $\pm 180^\circ$.

Особенностью горизонтальной системы является то, что координаты светила в этой системе все время изменяются вследствие суточного вращения небесной сферы. Каждое светило описывает в течение суток малый круг в плоскости, перпендикулярной к оси мира, который параллелен небесному экватору и называется *небесной параллелью* (NC или $C_1C_2C_3$ на рис. 5).

Вообще говоря, этот круг наклонен под некоторым углом к горизонту. Светило, совершая в течение суток этот круг, имеет наибольшую высоту в верхней кульминации, там, где параллель пересекает меридиан. До этого высота светила увеличивается, а затем уменьшается. Одновременно изменяется и азимут. В момент верхней кульминации светила он равен 0° .

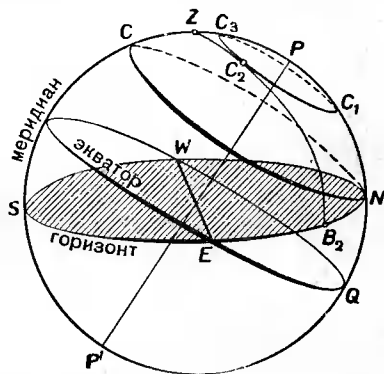


Рис. 5. Изменение горизонтальных координат при суточном вращении небесной сферы

¹ В геодезии, в мореходной и авиационной астрономии отсчет азимутов часто ведется от точки севера к востоку.

Вследствие наклонности небесной параллели к горизонту при равномерном суточном вращении небесной сферы изменение высот и азимутов происходит, вообще говоря, неравномерно. Наиболее медленно меняются высоты близ меридианов.

Таким образом, горизонтальные координаты светила имеют свое определенное значение только для некоторого момента времени. Поэтому по ним невозможно построить звездную карту или составить каталог звезд для постоянного пользования. Это их недостаток, достоинство же их заключается в сравнительной легкости их измерения. В целях построения звездных карт или каталогов звезд для постоянного пользования имеется другая система координат, отнесенная к небесному экватору.

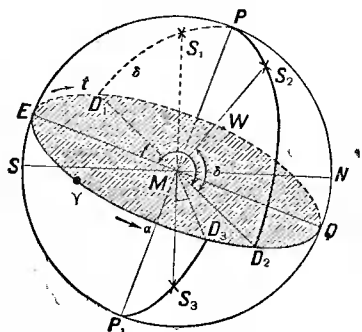


Рис. 6. Экваториальная система координат

§ 7. Экваториальные системы небесных координат. Если за основную плоскость сферических координат принять плоскость небесного экватора, то мы будем иметь экваториальную систему небесных координат с полюсом в полюсе мира. Проведя большой круг через полюс мира и данную точку (положение светила) на небесной сфере, получим первую координату экваториальной системы, называемую *склонением* и обозначаемую буквой δ ($\angle S_1MD_1$, или $\angle S_2MD_2$, или $\angle S_3MD_3$ на рис. 6).

Склонение звезды измеряется дугой большого круга, проходящего через полюс мира и звезду от экватора до звезды. Этот большой круг лежит в плоскости, перпендикулярной к небесному экватору, и называется *кругом склонения*. Склонение может быть расположено или в сторону северного полюса мира от экватора, или в сторону южного полюса мира. Поэтому различается склонение положительное, или северное, и отрицательное, или южное. Таким образом, склонение изменяется от 0 до $\pm 90^\circ$, причем положительное склонение имеют все звезды северного небесного полушария (S_1, S_2 на рис. 6), а звезды южного небесного полушария имеют отрицательное склонение (S_3 на рис. 6).

Одно склонение не определяет положения светила, так как то же склонение будут иметь и все другие светила, расположенные на одной небесной параллели.

Вторую координату мы получим как дугу экватора. За точку отсчета на экваторе принимают точку пересечения его с южной стороной меридиана. Дугу небесного экватора от южной стороны меридиана до круга склонения светила в сторону суточного вращения, т. е. к западу, называют *часовой дугой* и обозначают буквой t ($\angle ED_1$, или $\angle EWQD_2$, или $\angle EWQD_3$ на рис. 6).

Часовой угол можно определить как двугранный угол между плоскостями меридиана и круга склонения светила ($EMPD_1$ или $EMPD_2 > 180^\circ$ на рис. 6). Часовой угол изменяется от 0 до 360° . Если даны часовой угол и склонение, то известно положение светила на небесной сфере. Например, $\delta = 0^\circ$ и $t = 90^\circ$ соответствуют точке запада; $\delta = 0^\circ$ и $t = 270^\circ$ — точке востока; если $\delta = 30^\circ$ и $t = 300^\circ$, то звезду надо искать в юго-восточной части неба.

В отличие от горизонтальных координат склонения звезд не изменяются при суточном вращении небесной сферы, так как они движутся по небесным параллелям. Часовые же углы светил непрерывно изменяются, но при этом в отличие от азимутов это изменение происходит пропорционально времени, так как суточное вращение небесной сферы совершается равномерно и суточные круги светил параллельны экватору.

Равномерность изменения часовых углов имеет очень важное значение, так как она используется при измерении времени. Часовые углы очень часто выражаются в единицах времени, если считать полный круг в 360° за 24 часа. Иначе — дугой в 1 час можно считать $\frac{1}{24}$ часть окружности. Чтобы выразить один и тот же часовой угол в тех или иных единицах, следует запомнить следующие соотношения:

24 часа	или $24^h = 360^\circ$	$360^\circ = 24^h$
1 час	или $1^h = 15^\circ$	$1^\circ = 4^m$
1 минута	или $1^m = 15'$	$1' = 4^s$
1 секунда	или $1^s = 15''$	

Заметим, что 1^m составляет $\frac{1}{1440}$ часть окружности, тогда как $1' = \frac{1}{21\,600}$ окружности; подобным образом отличаются 1^s и $1''$ как шестидесятые доли временной и дуговой минуты.

П р и м е р ы. Часовой угол точки запада равняется 90° или 6^h ; $t = 310^\circ 30' = 20^h 42^m$.

Для составления звездных карт и каталогов звезд часовой угол также не может быть применен, как и горизонтальные координаты. В этих целях вводится другая экваториальная система небесных координат, в которой одной из координат является то же склонение δ , а вместо часового угла берется другая координата, не изменяющаяся при суточном вращении небесной сферы. Для этого на экваторе за точку отсчета принимается определенная точка, участвующая в суточном вращении наравне со звездами, а именно та точка экватора, в которой находится центр Солнца весной как раз в момент весеннего равноденствия (около 21 марта). До того Солнце бывает в южном небесном полушарии, а в этой точке переходит в северное небесное полушарие. Она называется *точкой весеннего равноденствия* и обозначается знаком γ (знак созвездия Овна, в котором в древние времена находилась эта точка; теперь она находится в созвездии Рыб). *Дуга экватора от точки весеннего*

равноденствия до круга склонения светила принимается за вторую экваториальную координату, которая называется *прямым восхождением* и обозначается буквой α .

Прямое восхождение отсчитывается от точки весеннего равноденствия в сторону, противоположную видимому суточному вращению небесной сферы, т. е. от запада к востоку, или против часовой стрелки, если смотреть с северного полюса мира ($\sphericalangle D_2$ или $\sphericalangle QWD_1 > 180^\circ$ на рис. 6). Прямое восхождение можно определить как двугранный угол между кругом склонения, проходящим через точку весеннего равноденствия (начальный круг склонений) и кругом склонения данного светила.

Прямое восхождение α изменяется от 0 до 360° . Так же как и часовой угол t , прямое восхождение измеряется чаще всего в таких же единицах, как и время, т. е. в часах, минутах и секундах. Например, прямое восхождение $155^\circ 20' 30'' = 10^h 21^m 22^s$.

Склонение δ и прямое восхождение α вполне определяют положение светила на небесной сфере и притом они не изменяются при суточном ее вращении. Каждая звезда имеет свои определенные α и δ . Эти координаты и служат для построения звездных карт таким же образом, как географические карты строятся по широтам и долготам мест на Земле.

Если мы обратимся к картам северного звездного неба позади текста, мы увидим на них сетку координат с центром в полюсе мира. Небесные параллели представлены концентрическими кругами, а круги склонений — радиально расходящимися прямыми линиями. Отсчеты прямых восхождений помечены на внешнем круге в часах. Отсчеты склонений помечены на диаметре, продолжение которого проходит через точку весеннего равноденствия. Карты охватывают часть северного небесного полушария и часть южного небесного полушария до склонений $\delta = \pm 40^\circ$.

На карте экваториальной полосы небесный экватор и параллели изображены горизонтальными параллельными прямыми, а круги склонений — вертикальными прямыми.

Пользуясь сеткой, легко найти на карте звезду, зная ее экваториальные координаты, и обратно — определить координаты любой звезды, изображенной на карте. Например, взяв из каталога звезд координаты $\alpha = 18^h 35^m$ и $\delta = +39^\circ$, мы находим на внешнем круге 18 час. 35 мин., от этой точки направляемся прямо к центру карты и в пересечении с небесной параллелью, соответствующей отсчету на круге склонений $+39^\circ$, мы увидим звезду Вега. Найдем на экваториальной карте звезду Сириус в созвездии Большого Пса. Проведя через нее вертикальную прямую линию, мы увидим, что она пройдет через точку, близкую к отсчету $6^h 42^m$, а проведя небесную параллель через звезду Сириус, мы найдем ее склонение около -17° . Координаты звезды Сириуса $\alpha = 6^h 42^m$; $\delta = -16^\circ 37'$.

§ 8. Связь между высотой полюса мира и широтой места наблюдения. Высота светила в меридиане. Видимое суточное вращение всего звездного неба есть отражение действительного враще-

Земли в обратном направлении. Поэтому направление оси мира, в какой бы точке на поверхности Земли мы ни взяли центр небесной сферы, всегда параллельно оси вращения Земли. Вертикальное же направление, а следовательно, и горизонтальная плоскость меняет свое направление при перемещении наблюдателя по земной поверхности. Вместе с тем изменяется и угол наклона оси мира к плоскости горизонта.

Положение точки на Земле определяется географическими координатами: *широтой* и *долготой*. Широта места на Земле представляет собой измеренную в градусах дугу земного меридиана от земного экватора до данной точки на земной поверхности или угол между вертикальным направлением и плоскостью экватора. Между широтой места и высотой полюса мира существует зависимость: *высота полюса мира над горизонтом равна широте места наблюдения*.

В самом деле, пусть круг на рисунке 7 изображает Землю, а M — место наблюдателя. Широта места M есть угол φ с вершиной в центре Земли.

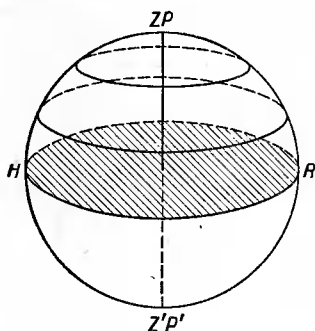


Рис. 8. Суточные движения звезд на полюсе Земли

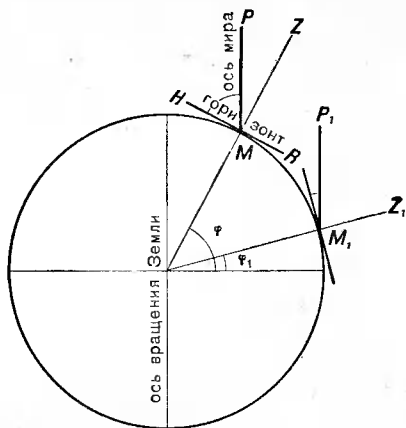


Рис. 7. Связь между географической широтой и высотой полюса мира

Прямая HR , перпендикулярная к вертикали, указывает положение плоскости горизонта в данном месте, а прямая MP , параллельная оси Земли, есть направление оси мира. Нетрудно видеть, что $\angle PMH = \varphi$ как углы с взаимно перпендикулярными сторонами, т. е. высота полюса мира равна широте места наблюдения.

Отсюда видно, что с изменением места наблюдения на Земле по широте (M и M_1 на рис. 7) меняется и положение оси мира по отношению к горизонту, а стало быть, и общий вид звездного неба.

Для наблюдателя на полюсе Земли широта равна 90° — значит, полюс мира находится в зените, ось мира вертикальна, небесный экватор совпадает с горизонтом и суточные круги светил параллельны горизонту; все звезды в течение суток движутся на одной высоте, нет восходящих и заходящих звезд (рис. 8).

Для наблюдателя на экваторе Земли широта равна 0° — полюс мира находится на горизонте, ось мира расположена в плоскости

горизонта, все суточные параллели лежат в плоскости, перпендикулярной к горизонту, небесный экватор совпадает с первым вертикалом и проходит через зенит, суточные круги звезд расположены в плоскостях, перпендикулярных к горизонту,— все светила восходят и заходят (рис. 9).

Для наблюдателя на какой-нибудь промежуточной широте, например, широте Москвы $55^{\circ}45'$, ось мира наклонена к плоскости горизонта под углом $55^{\circ}45'$, небесный экватор наклонен к горизонту под углом $90^{\circ} - 55^{\circ}45' = 34^{\circ}15'$ (см. рис. 5 и 10). Одни из звезд (близкие к северному полюсу мира) совершают свои суточные круги, никогда не заходя за горизонт; другие (близкие к южному полюсу)—наоборот, никогда не восходят, оставаясь все время под горизонтом, и, наконец, есть звезды восходящие и заходящие.

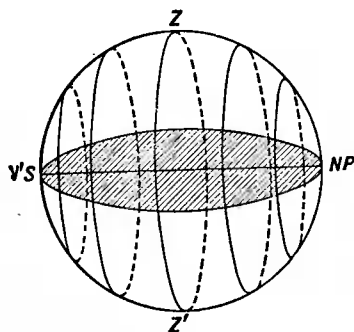


Рис. 9. Суточные движения звезд на земном экваторе

Светило, совершающее свой суточный путь по параллели, в нижней кульминации только коснется горизонта в точке N и в течение всех суток будет над горизонтом. Точка N имеет склонение, равное дуге $QN = 90^{\circ} - \varphi$. Таким образом, для того чтобы светило в данном месте не заходило, нужно, чтобы соблюдалось условие:

$$\delta \geq 90^{\circ} - \varphi.$$

Обратившись к южному небесному полушарию, мы там увидим такую же небесную параллель с южным склонением, равным и противоположным дуге QN , т. е. равным $-(90^{\circ} - \varphi)$, которая отделяет область звезд, не восходящих в данном месте Земли. Тем более будет *невосходящим* всякое светило, имеющее южное склонение, большее по абсолютной величине, чем $90^{\circ} - \varphi$. Поэтому можно написать общее условие для незаходящих и невосходящих светил в данном месте:

$$|\delta| \geq 90^{\circ} - \varphi,$$

т. е. абсолютная величина склонения должна быть равна или больше $(90^{\circ} - \varphi)$. При этом для наблюдателя северного полушария Земли *незаходящими* будут светила с положительным склонением, а *невосходящими* — светила с отрицательным склонением.

Все остальные светила, расположенные по обе стороны небесного экватора, восходят и заходят. Условием, чтобы светило в данном месте восходило и заходило, служит:

$$|\delta| < 90^{\circ} - \varphi.$$

Например, широта Москвы $\varphi = 55^{\circ}45'$ и $90^{\circ} - \varphi = 34^{\circ}15'$, широта Ленинграда $\varphi = 60^{\circ}$ и $90^{\circ} - \varphi = 30^{\circ}$. Для московского наблю-

дателя звезда α созвездия Близнецов, имеющая склонение $\delta = +32^\circ$, является заходящей, а для ленинградского наблюдателя она не заходит круглые сутки. Звезда α Южной Рыбы, имеющая склонение $\delta = -30^\circ$, в Ленинграде только касается горизонта в точке юга и является невосходящей, а в Москве относится к восходящим звездам, хотя поднимается над горизонтом в верхней кульминации всего на 4° .

Выведенная нами связь между широтой места наблюдения и высотой полюса мира над горизонтом имеет очень важное значение для определения широт пунктов земной поверхности и составления географических карт. Она дает возможность находить географическую широту из наблюдений небесных светил.

Простейший способ определения высоты полюса мира заключается в двукратном измерении высоты какой-нибудь околополярной звезды в моменты ее верхней и нижней кульминаций, например Полярной или одной из звезд Большой Медведицы. На рисунке 10 круг изображает небесный меридиан с зенитом Z и полюсом мира P на нем, S_1 —положение звезды в верхней кульминации, S'_1 —положение той же звезды в нижней кульминации. Высота звезды в верхней кульминации $h_1 = \sphericalangle S_1R$. Высота звезды в нижней кульминации $h_2 = \sphericalangle S'_1R$. Высота полюса h_P найдется по формулам:

$$\begin{aligned} h_1 &= h_P + PS_1, \\ h_2 &= h_P - PS'_1, \\ h_1 + h_2 &= 2h_P, \end{aligned} \quad h_P = \frac{h_1 + h_2}{2} = \varphi.$$

Этот способ определения высоты полюса мира требует двух наблюдений одной и той же звезды с промежутком времени в полсуток, что не всегда возможно. Если же известно склонение светила, то, измеряя зенитное расстояние или высоту его, можно одним наблюдением получить значение широты места. Этот способ основан на зависимости между горизонтальными, экваториальными координатами и широтой места. Когда светило находится в меридиане, кульминирует, то круг высоты светила и его круг склонения совпадают с небесным меридианом, и искомая зависимость получится из рассмотрения рисунка 10, представляющего небесный меридиан. Если светило кульминирует в точке S , то склонение звезды $\delta = \sphericalangle ES$, высота ее $h = HS$. Дуга HE измеряет наклон плоскости экватора к плоскости горизонта, который зависит от широты места и равен $90^\circ - \varphi$. Следовательно:

$$h = \delta + 90^\circ - \varphi.$$

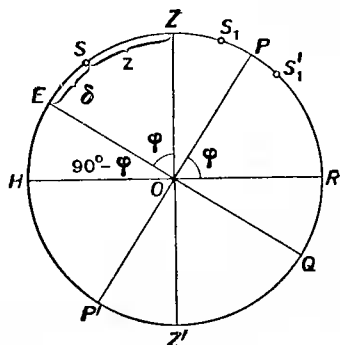


Рис. 10. Связь между h , z , δ и φ , когда светило в меридиане

Эта формула связывает три величины h , δ , φ и позволяет вычислить любую из них, когда известны две другие: 1) измерив высоту светила в верхней кульминации и взяв ее склонение из справочника, найдем широту места $\varphi = \delta + 90^\circ - h$; 2) зная широту своего места и измерив высоту, определим склонение $\delta = h - 90^\circ + \varphi$; 3) зная широту места наблюдения и взяв из справочника склонение светила, вычислим высоту его в момент верхней кульминации.

Например, зная, что в весеннее равноденствие Солнце находится на экваторе, а значит, склонение его равно нулю, мы получим полуденную высоту Солнца для этого времени в Москве около 34° .

Еще проще получится формула для вычисления широты, если вместо высоты ввести зенитное расстояние $z = 90^\circ - h$. Формула примет вид:

$$\varphi = \delta + z.$$

Это же показывает рисунок 10: $\angle EOZ = \angle POR$ как углы с взаимно перпендикулярными сторонами. Следовательно, $\angle EZ = \varphi$.

Таким образом, *широта места наблюдения равна зенитному расстоянию экватора* (точнее — точки пересечения небесного экватора с небесным меридианом). С другой стороны, *склонение зенита равно широте места наблюдения*.

Полученная формула несколько изменяется, если светило кульминирует между зенитом и полюсом мира, например в точке S_1 . В этом случае склонение звезды $\delta = \angle ES_1$, зенитное расстояние $z = S_1Z$ и $\angle EZ = \angle ES_1 - S_1Z$, т. е. $\varphi = \delta - z$, где z входит со знаком минус. Обе формулы можно объединить в одну следующую:

$$\varphi = \delta \pm z.$$

При этом плюс берется для звезд, кульминирующих к югу от зенита, а минус — для звезд, кульминирующих к северу от зенита. Соответственно и формула для определения высоты светила в последнем случае, как это видно на рисунке 10, имеет вид:

$$h = 90^\circ - \delta + \varphi.$$

§ 9. Видимое годовое движение Солнца и изменение его экваториальных координат. Наблюдения за изменением вида ночного неба в различные месяцы на протяжении года приводят нас к тому заключению, что Солнце как бы перемещается среди звезд, совершая полный оборот за год. Мы каждый раз в полночь видим кульминирующими на южной стороне те звезды, которые находятся в данное время в противоположной стороне от Солнца. При этом оказывается, что одни звезды постепенно уступают свое место на меридиане другим в полночь. Меняется и полуденная высота Солнца для одного и того же места на Земле, тогда как каждая звезда кульминирует всегда на одной и той же высоте.

Мы можем более точно определить видимое годовое изменение положения Солнца, если проследим, как меняются экваториальные координаты δ и α центра Солнца. Склонение Солнца для каждого

полудня можно определить по формуле $\varphi = \delta + z$ (Солнце у нас всегда кульминирует к югу от зенита). Измерениями зенитного расстояния или высоты в полдень (момент верхней кульминации) на протяжении года при одной и той же широте места установлено, что склонение Солнца постепенно изменяется в пределах от $+23^{\circ}27'$ до $-23^{\circ}27'$, переходя два раза в год через нуль.

Прямое восхождение Солнца можно определять по тем звездам, которые кульминируют в полночь (разность прямых восхождений

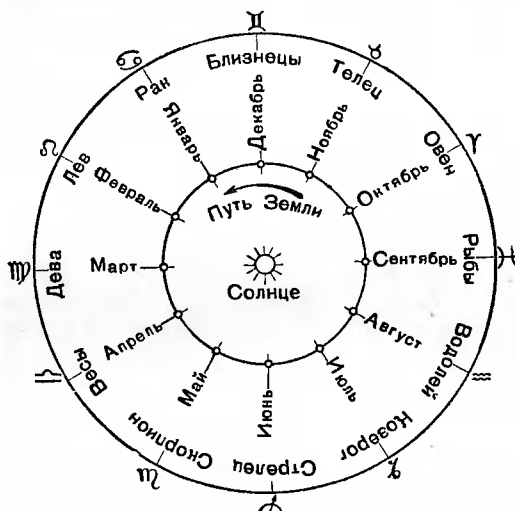


Рис. 11. Видимое движение Солнца по зодиаку и действительное движение Земли вокруг Солнца

180° , или 12^h). Эти измерения показали, что прямое восхождение (α) Солнца изменяется в течение года от 0 до 360° , или до 24^h . За месяц Солнце перемещается в среднем на 30° , или на 2 часа, а за сутки — приблизительно на 1° , или на 4^m . При этом прямое восхождение все время возрастает, а это значит, что Солнце перемещается среди звезд в сторону, противоположную видимому суточному вращению звездного неба (от запада к востоку).

Рассматривая непрерывное изменение обеих координат δ и α центра Солнца в течение года, мы получим геометрическое место точек, расположенных на небесной сфере по большому кругу ее в плоскости, наклоненной к плоскости небесного экватора под углом $23^{\circ}27'$ (рис. 12). Этот большой круг называется *эклиптикой*.

На звездном небе эклиптика проходит среди созвездий, которым в древности даны названия преимущественно животных (греческое «зоон»), почему и весь этот пояс созвездий назван *зодиаком*. Этих созвездий 12, по числу 12 месяцев в году, и Солнце в течение года переходит из одного созвездия в другое в следующем порядке:

Рыбы, Овен, Телец — весной; Близнецы, Рак, Лев — летом; Дева, Весы, Скорпион — осенью; Стрелец, Козерог, Водолей — зимой (рис. 12, смотря с Земли).

На ночном же небе Рыбы, Овен, Телец видны осенью, а Близнецы, Рак, Лев — зимой и т. д.

Эклиптика пересекается с экватором в двух диаметрально противоположных точках. Когда Солнце оказывается близ этих точек, половина его суточного пути располагается над горизонтом и половина под горизонтом, так как экватор горизонтом делится на две равные части. Наступает равноденствие.

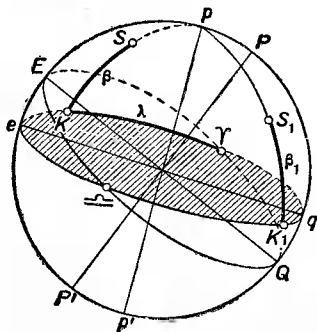


Рис. 12. Эклиптика и эклиптическая система координат

Точки пересечений эклиптики с экватором и называются точками равноденствий — весеннего и осеннего. В точке весеннего равноденствия γ^1 Солнце, двигаясь по эклиптике против суточного вращения, переходит из южного небесного полушария в северное, от отрицательных склонений к положительным (полуденная высота Солнца увеличивается). В диаметрально противоположной точке осеннего равноденствия, обозначаемого $\simeq$ (знак созвездия Весов, в котором прежде находилась эта точка, теперь

она находится в соседнем созвездии Девы), Солнце переходит из северного полушария в южное.

Кроме двух равноденственных точек, мы отметим на эклиптике еще две диаметрально противоположные точки, в которых склонение Солнца достигает максимума по абсолютной величине: точку летнего солнцестояния с координатами $\delta = +23^\circ 27'$, $\alpha = 6^\circ$ и точку зимнего солнцестояния с координатами $\delta = -23^\circ 27'$, $\alpha = 18^\circ$.

Вблизи точек солнцестояний склонение Солнца меняется очень медленно, так как здесь движение Солнца по эклиптике происходит почти параллельно экватору. Солнце как бы останавливается на несколько дней на одной полуденной высоте, откуда и произошло название «солнцестояние».

Четыре главных положения Солнца на небесной сфере в течение года можно представить таблицей:

δ	α
Весеннее равноденствие 0°	0° или 0° — около 21 марта
Летнее солнцестояние $+23^\circ 27'$	90° » 6° — » 22 июня
Осеннее равноденствие 0°	180° » 12° — » 23 сентября
Зимнее солнцестояние $-23^\circ 27'$	270° » 18° — » 22 декабря

¹ Хотя теперь точка весеннего равноденствия располагается в созвездии Рыб, но за ней сохраняется по ее прежнему расположению знак созвездия Овна.

Моменты прохождения центра солнечного диска через точки равноденствий и солнцестояний принимаются за начало соответствующих времен года. Указанные календарные даты не точны, они могут приходиться и на соседние дни. Причина таких колебаний заключается в нашем календарном счете времени, при котором продолжительность года не равна в точности периоду прохождения Солнца через точку весеннего равноденствия, и календарные годы бывают и по 365 и по 366 дней.

В день весеннего равноденствия Солнце, находясь на небесном экваторе в точке пересечения его с эклиптической, восходит близ точки востока и заходит близ точки запада, день равен ночи, полуденная высота равна высоте экватора в данном месте ($90^\circ - \varphi$). Это положение принимается за начало весны (около 21 марта). Затем с каждым днем точки восхода и захода перемещаются к северу, продолжительность дня увеличивается, продолжительность ночи уменьшается, полуденная высота растет соответственно увеличению склонения Солнца. Этим характеризуется переход от весны к лету. В день летнего солнцестояния полуденная высота Солнца достигает наибольшей величины ($90^\circ - \varphi + 23^\circ 27'$) и долгота дня — наибольшей продолжительности. Это — начало лета (около 22 июня). Затем с каждым днем полуденная высота Солнца уменьшается, а вместе с тем и день становится короче, точки восхода и захода Солнца приближаются к востоку и западу.

Когда Солнце вновь приходит на экватор, в другую точку пересечения с эклиптической, оно восходит опять на востоке и заходит на западе, и всюду на Земле — равноденствие. Это — начало осени (около 23 сентября). Полуденная высота Солнца все уменьшается, ночь становится длиннее дня, и точки восхода и захода перемещаются по горизонту в сторону юга.

Наименьшая полуденная высота Солнца и наиболее короткий день соответствуют зимнему солнцестоянию около 22 декабря — началу зимы.

Мы рассмотрели в основном явления видимого движения Солнца по временам года для одного какого-нибудь места на Земле в средних широтах северного земного полушария. Для различных же мест по широте годовое положение Солнца над горизонтом будет разное в одно и то же время. Если наблюдатель находится на северном полюсе Земли, то для него Солнце, как и все светила, может быть при суточном вращении только или незаходящим, или невосходящим в зависимости от того, находится ли оно в северном небесном полушарии или южном.

Это показывает условие видимости $\delta \geq 90^\circ - \varphi$, которое для полюса при $\varphi = 90^\circ$ обращается в $\delta \geq 0^\circ$. Около 21 марта Солнце здесь показывается на горизонте и уже потом целые полгода остается над горизонтом; это — полярный день. Солнце поднимается постепенно до высоты $23^\circ 27'$ около 22 июня, а затем опускается опять к горизонту и, наконец, скрывается под ним на

всю вторую половину года — наступает полярная ночь (около 23 сентября)¹.

По мере того как наблюдатель удаляется от земного полюса, как показывает правая часть формулы $\delta \geq 90^\circ - \varphi$, продолжительность полярного дня и полярной ночи уменьшается, растет число суток со сменой дня и ночи. Широта $66^\circ 33'$, т. е. $23^\circ 27'$ от полюса Земли, является предельной, на которой Солнце еще может остаться круглые сутки над горизонтом. Широтой $66^\circ 33'$ и определяется *северный полярный круг* на Земле, между которым и полюсом расположен так называемый *холодный пояс* Земли.

На географической широте $23^\circ 27'$ полуденная высота Солнца может достигнуть 90° , как это видно из формулы $h = \delta + 90^\circ - \varphi$. Это будет только в день летнего солнцестояния, когда склонение Солнца δ достигает $+23^\circ 27'$. На всех широтах, меньших $23^\circ 27'$, Солнце дважды в году может быть в зените. Например, для широты 20° это будет 21 мая и 23 июля, так как в эти дни склонение Солнца близко к 20° . На самом же экваторе полуденное Солнце бывает в зените как раз в дни весеннего и осеннего равноденствий, а в дни солнцестояний спускается всего ниже, летом — к северу от зенита на $23^\circ 27'$, зимой — к югу на столько же.

Подобные же явления происходят и в южном полушарии Земли с тем только различием, что во время нашего лета там бывает зима, во время нашей весны — осень и т. д.

Наиболее низкое положение полуденного Солнца для экватора Земли ($66^\circ 33'$) значительно больше, чем наивысшее положение его для полюса ($23^\circ 27'$).

Пояс Земли между параллелями $+23^\circ 27'$ и $-23^\circ 27'$, где полуденное Солнце может быть в зените, называется *жарким поясом*, а самые эти параллели — *тропиками*: *тропик Рака* — в северном полушарии ($\varphi = +23^\circ 27'$), *тропик Козерога* — в южном полушарии ($\varphi = -23^\circ 27'$).

Таким образом, весь земной шар делят на 5 тепловых поясов: жаркий, два холодных — северный и южный (Арктика и Антарктика), два умеренных между ними (северный — между $\varphi = 23^\circ 27'$ и $\varphi = 66^\circ 33'$, южный — между $\varphi = -23^\circ 27'$ и $\varphi = -66^\circ 33'$).

Все наблюдаемые явления, которые описаны в этом параграфе, вполне объясняются двумя движениями Земли в пространстве: вращением около оси и обращением вокруг Солнца. Эти движения происходят так, что ось вращения наклонена к плоскости земной орбиты (пути Земли вокруг Солнца) под углом $66^\circ 33'$, а значит, плоскость экватора наклонена к плоскости орбиты под углом $90^\circ - 66^\circ 33' = 23^\circ 27'$. Когда Земля обращается вокруг Солнца, мы наблюдаем кажущееся перемещение Солнца среди звезд по эклип-

¹ Вследствие рефракции восход светил совершается раньше, а заход позднее; в результате этого полярный день на несколько суток продолжительнее полярной ночи. Эту поправку надо иметь в виду и при рассмотрении явлений на полярном круге.

тике в том же направлении (против стрелки часов, глядя с северного полюса).

Следовательно, плоскость эклиптики совпадает с плоскостью земной орбиты. Вот почему на небесной сфере плоскость эклиптики составляет с плоскостью небесного экватора угол $23^{\circ}27'$. Более точная величина этого наклона для начала 1950 г. составляет $23^{\circ}26'45''$; она в настоящее время ежегодно уменьшается на $0''$, 468. Это изменение, как влияние прецессии, которая также изменяет направление земной оси, очень мало. Поэтому мы можем принять, что за время обращения Земли вокруг Солнца земная ось сохраняет неизменное направление в пространстве, т. е. перемещается параллельно самой себе. Эти два обстоятельства — значительный наклон плоскости земного экватора к плоскости ее орбиты ($23^{\circ}.5$) и параллельность перемещения оси в пространстве за время обращения Земли вокруг Солнца — обуславливают смену времен года на Земле.

При суточном вращении Земли каждая точка ее поверхности движется по параллели, проведенной через эту точку. Зимой и летом для северного полушария земная ось располагается относительно Солнца так, как показывает рисунок 13. Соответственно располагается земной экватор по отношению к плоскости земной орбиты, а следовательно, плоскость небесного экватора к плоскости эклиптики.

В это время при суточном вращении Земли для всякой точки, кроме лежащей на экваторе, продолжительность пребывания на освещенной стороне Земли и на темной, очевидно, неодинакова. Отсюда — разница в продолжительности дня и ночи, причем наибольшей продолжительности дня в каком-нибудь месте Земли соответствует наиболее высокое положение Солнца, более сильное нагревание земной поверхности.

Дважды в год (весной и осенью) ось располагается так, что граница света и тени проходит как раз через полюсы Земли. В эти дни продолжительность пребывания любой точки Земли на освещенной и на темной сторонах Земли одинакова, т. е. день везде равен ночи и оба полушария симметрично направлены к солнечным лучам. Это — весеннее равноденствие (около 21 марта) и осеннее равноденствие (около 23 сентября).

Из рисунка 13 ясно, что на полюсах день и ночь продолжаются по полгода, на экваторе день всегда равен ночи и в северном и южном полушариях времена года противоположны (когда в одном полушарии зима, в другом — лето).

Продолжительность четырех времен года из-за эллиптичности земной орбиты и из-за неравномерности движения Земли вокруг Солнца не совсем одинакова.

Для смены времен года весьма важны вековые изменения наклона оси вращения Земли к плоскости ее орбиты. Угол этого наклона, сейчас увеличивающийся, меняется на протяжении десятков тысячелетий в пределах от 21° до 25° , т. е. сравнительно немного.

Нужно еще отметить, что Земля проходит через перигелий, т. е. в наиболее близком расстоянии от Солнца, около 3 января — зимой, а через афелий, т. е. в наиболее далеком расстоянии от Солнца, около 5 июля — летом. Этим, правда, в очень небольшой степени ослабляется несколько суровость зимы и летний зной

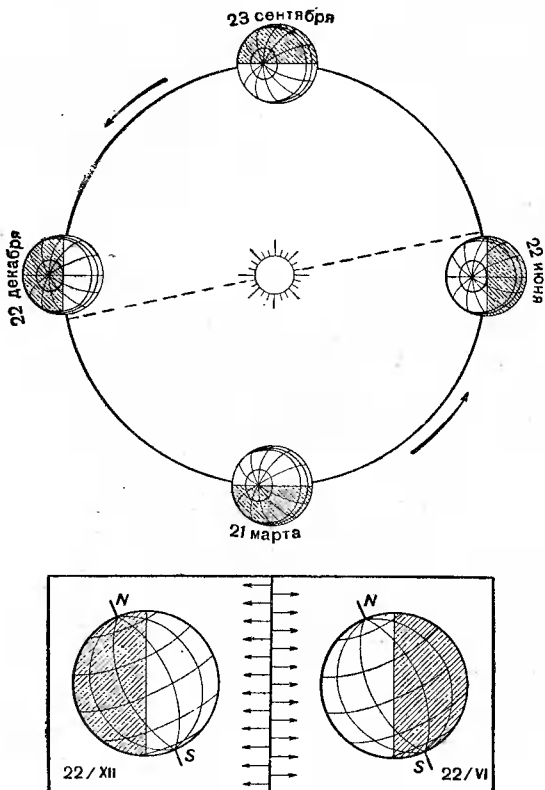


Рис. 13. Объяснение времен года:
 сверху — вид с полюса эклиптики; внизу — вид
 в направлении плоскости земной орбиты

в нашем северном полушарии, но в общей смене времен года это роли не играет.

Те пять тепловых поясов на земле — жаркий, два умеренных и два холодных, также связаны с наклоном оси вращения Земли к плоскости земной орбиты.

§ 10. Эклиптическая система координат. Плоскость эклиптики может быть принята за основную для особой системы небесных координат — *эклиптической системы*. Эта система удобна при рассмотрении движений Луны и планет, пути которых на небе близки

к эклиптике. Перпендикуляр к плоскости эклиптики из центра небесной сферы называют *осью эклиптики*, а точки его пересечения с небесной сферой — *полюсами эклиптики*.

Первая координата этой системы — *эклиптическая широта светила* (β) — есть угол между лучом зрения от наблюдателя к светилу и плоскостью эклиптики ($\angle SK$ на рис. 12). Широта светила может быть измерена и дугой большого круга (круга широт), проходящего через данное светило и полюс эклиптики. Широта считается положительной к северному полюсу от эклиптики и отрицательной к южному и изменяется в пределах от $+90^\circ$ до -90° .

Вторая координата — *эклиптическая долгота светила* (λ), т. е. дуга эклиптики между точкой весеннего равноденствия и точкой пересечения основного круга с кругом широты ($\angle K$). Долгота считается в пределах от 0 до 360° от точки весеннего равноденствия в направлении, обратном видимому суточному вращению небесной сферы, т. е. в том же направлении, как прямое восхождение в экваториальной системе.

Широта и долгота светила не зависят от суточного вращения небесной сферы подобно склонению и прямому восхождению.

§ 11. Измерение времени. Звездное время. Судить о протекшем времени мы можем по тому или иному движению. Таким образом, основой измерения времени служит движение материи. С незапамятных времен человек воспринимал течение времени по периодической смене дней и ночей, а потом и времен года. Но, как теперь мы знаем, эти смены суть отражение действительных движений Земли. Из всех доступных нам повторяющихся движений в природе именно вращение Земли вокруг оси в наибольшей степени удовлетворяет требованиям измерения: постоянства меры, связи с практикой. Исходной величиной для всех принятых способов измерения времени и служит промежуток, в который Земля совершает полный оборот вокруг оси и который является с высокой степенью точности постоянным.

Судить о вращении Земли мы можем по наблюдаемому нами видимому суточному вращению неба. Для этого можно заметить какое-либо светило или определенную точку небесной сферы и наблюдать изменение ее часового угла. В зависимости от того, что мы возьмем, будут получаться различные способы измерения времени. Рассматривая в дальнейшем эти различные способы, нужно иметь в виду, что время как форма существования материи существует только одно. Если же мы употребляем разные названия времени (звездное, солнечное и др.), то это относится лишь к различным способам измерения одного и того же времени.

Промежуток времени между последовательными верхними кульминациями одной и той же звезды, очевидно, будет близко соответствовать времени одного оборота Земли вокруг ее оси. В астрономии для измерения времени условились брать не ту или иную звезду на небесной сфере, а точку весеннего равноденствия: *за начало звездных суток принимают момент верхней кульминации*

точки весеннего равноденствия. Следовательно, звездные сутки есть промежуток времени между двумя последовательными моментами верхних кульминаций точки весеннего равноденствия¹.

В начале звездных суток часовой угол точки весеннего равноденствия равен нулю, а затем он с течением времени растет, и о времени, прошедшем от начала суток, мы можем судить по величине этого часового угла. Таким образом, время, единицей которого служат звездные сутки и которое называют для краткости *звездным временем*, измеряется часовым углом точки весеннего равноденствия, выраженным в часах, минутах и секундах (а не в градусах).

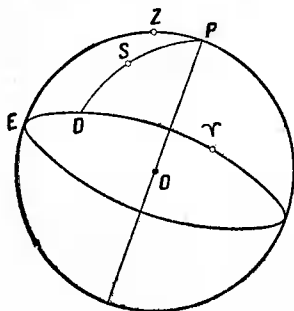


Рис. 14. Связь между прямым восхождением светила и звездным временем

Практически непосредственно находить звездное время по положению точки весеннего равноденствия не представляется возможным, так как она не видна на небе. Это затруднение мы разрешаем, устанавливая связь звездного времени с прямым восхождением звезды. В самом деле (рис. 14), прямое восхождение звезды $\alpha = \overset{\frown}{ED}$, часовой угол той же звезды $t = \overset{\frown}{E\gamma}$, а звездное время, измеряемое часовым углом точки весеннего равноденствия, $s = E\gamma$. Нетрудно видеть из чертежа, что $\overset{\frown}{E\gamma} = \overset{\frown}{ED} + \overset{\frown}{\gamma D}$, или $s = t + \alpha$.

Если звезда находится в верхней кульминации, то $t = 0$, и мы имеем $s = \alpha$.

Таким образом, звездное время в данный момент численно равно прямому восхождению светила, находящегося в верхней кульминации в этот момент.

Это соотношение дает возможность определять точное звездное время в момент кульминации звезд, для которых с большой точностью известны их прямые восхождения. Для этой цели на астрономических обсерваториях устанавливаются строго в плоскости меридиана так называемые пассажные инструменты (от французского слова «passage» — прохождение), в которые наблюдаются моменты прохождения звезд через меридиан, и на основании этих наблюдений производится проверка часов.

Звездное время очень удобно при решении ряда задач в астрономии, но оно оказывается совершенно неудобным для практической жизни, которую мы распределяем по Солнцу. Солнце же перемещается по небесной сфере, делая полный оборот в год, подходит к точке весеннего равноденствия весной и удаляется в противополож-

¹ Как мы увидим дальше, точка весеннего равноденствия не сохраняет неизменного положения среди звезд, а медленно смещается по эклиптике (на $50''$ в год) в сторону видимого суточного вращения, а потому звездные сутки не равны в точности промежутку времени между последовательными верхними кульминациями одной и той же звезды.

ную сторону небесной сферы осенью. Таким образом, начало звездных суток может приходиться в разное время года на ночь и на день. В гражданском обиходе удобнее производить измерение времени солнечными сутками.

§ 12. Солнечное время. Если принять по аналогии со звездным временем момент верхней кульминации центра Солнца (полдень) за начало солнечных суток, то мы получим сутки, которые называют истинными солнечными. *Истинными солнечными сутками называется промежуток времени между двумя последовательными моментами верхних кульминаций центра Солнца, а время, измеряемое часовым углом центра Солнца, называют истинным солнечным временем.* Так как Солнце вследствие годичного движения Земли перемещается в направлении, обратном видимому суточному вращению небесной сферы, т. е. с запада к востоку, совершая полный оборот по эклиптике за год, а за сутки передвигаясь почти на 1° (за $365\frac{1}{4}$ суток на 360°), солнечные сутки вообще длиннее звездных. Звездных суток в году оказывается на единицу больше, чем солнечных, т. е. $365\frac{1}{4}$ солнечных суток равно $366\frac{1}{4}$ звездных суток, так что солнечные сутки в среднем длиннее звездных почти на 4 минуты ($24 \cdot 60 : 365,25 = 3^m 56^s$).

Измерение времени истинными солнечными сутками осложняется тем, что продолжительность истинных солнечных суток в течение года неодинакова. Этому две причины: неравномерное движение Солнца по эклиптике и наклонение эклиптики к экватору. О неравномерности перемещения Солнца можно судить уже по тому, что одну половину эклиптики, лежащую в северном полушарии, Солнце проходит от 21 марта до 23 сентября за 186 суток, а другую половину — от 23 сентября до 21 марта — в продолжение 179—180 суток, т. е. в первом случае перемещается медленнее, чем во втором.

Это является отражением действительного неравномерного движения Земли согласно законам Кеплера. Влияние наклонения эклиптики будет понятно, если обратить внимание на то, что часовой угол измеряется по экватору, и для определения разницы между солнечными и звездными сутками надо смещение Солнца по эклиптике за сутки проектировать на экватор. Если бы даже Солнце двигалось равномерно по эклиптике, то и тогда проекции одинаковых дуг эклиптики на экватор были бы больше около солнцестояний и меньше около равноденствий.

Вследствие непостоянства продолжительности истинных суток их нельзя принять за единицу для измерения времени. Поэтому условились ввести так называемое «среднее солнце», которое представляет некоторую вспомогательную движущуюся точку.

При неравномерном видимом движении Солнца по эклиптике наибольшая скорость наблюдается в начале января, когда Земля бывает всего ближе к Солнцу, или, как говорят, находится в *перигелии* («пери» — вблизи, «гелиос» — Солнце). Представим себе точку на эклиптике, которая, совпадая в этот момент с центром Солнца, движется дальше по эклиптике равномерно так, чтобы совершить

полный оборот в тот же промежуток времени, что и Солнце. Эта точка называется *«средним эклиптическим солнцем»*. Но неодинаковость истинных солнечных суток обуславливается еще наклоном эклиптики к экватору. Представим себе, что в тот момент, когда «среднее эклиптическое солнце» проходит через точку весеннего равноденствия, от него отделяется новая точка и равномерным движением идет дальше, но не по эклиптике, а по экватору. Эту точку, равномерно движущуюся по небесному экватору, называют *«средним экваториальным солнцем»*. Его и используют для измерения времени.

Промежуток времени между двумя моментами последовательных одноименных кульминаций «среднего экваториального солнца» называется средними сутками, которые и служат единицей для принятого способа измерения времени, называемого для краткости *средним временем*. Средние солнечные сутки на 3 мин. 56 сек. (с точностью до 1 сек.) длиннее звездных. Как звездные, так и средние солнечные сутки делятся на 24 часа, а потому соответственно 1 час среднего времени длиннее 1 часа звездного времени, точно так же как и дальнейшие подразделения — минута и секунда.

1 ^ч зв. вр.	= 0 ^ч 59 ^м 50 ^с ,	17 ср. солн. вр.	1 ^ч ср. солн. вр.	= 1 ^ч 0 ^м 9 ^с ,	86 зв. вр.
1 ^м »	= 0,59, 84 »	» »	1 ^м »	= 1 0, 16 »	»
1 ^с »	= 1, 00 »	» »	1 ^с »	= 1, 00 »	»

Если за начало средних суток принять момент верхней кульминации «среднего солнца», то *среднее время равно часовому углу «среднего солнца»*. Но в гражданском обиходе удобнее иметь весь день отнесенным к одной календарной дате, а для этого начало гражданских суток относят к полудню, т. е. моменту нижней кульминации «среднего солнца». *Гражданское время равно среднему плюс 12 часов или часовому углу «среднего солнца» плюс 12 часов:*

$$T_m = T + 12^h,$$

где T_m — гражданское время, а T — среднее время.

При астрономическом счете времени начало солнечных суток почти совпадает с началом звездных суток в день весеннего равноденствия, при гражданском счете в этот день звездное и солнечное время отличаются друг от друга на 12 часов (звездное время впереди солнечного). Начало звездных суток близко к началу гражданских в день осеннего равноденствия. Исходя из этого, можно по показанию часов, идущих по среднему местному времени, вычислить, каково должно быть показание часов, идущих по звездному времени в этот же момент, и наоборот. Например, мы узнаем приблизительно, сколько должны показывать звездные часы в 10^ч 30^м среднего местного времени 7 ноября, если подсчитаем, на сколько звездные часы ушли вперед от дня осеннего равноденствия до 7 ноября. Прошло 45 суток, звездные часы ушли вперед

на $4^m \times 45 = 180^m = 3^h$, да за $10^h 30^m$ звездные часы ушли почти на 2 минуты. Искомое звездное время будет $10^h 30^m + 3^h + 2^m = 13^h 32^m$.

Определяя время по Солнцу, например, в полдень, мы найдем истинное солнечное время. Чтобы сказать, каково должно быть показание средних часов в этот момент, надо знать, какова разность между средним и истинным временем: $\eta = t - t_{\odot}$, где $t_{\odot}$ — истинное время. Эта разность (η) называется *уравнением времени*. Иначе говоря, *уравнение времени выражается числом минут и секунд, которое надо прибавить к истинному времени, чтобы получить среднее*.

Уравнение времени может быть положительным и отрицательным, и прибавлять его к истинному надо с его знаком. Обозначим часовой угол истинного Солнца через t , а «среднего солнца» — через t_m . Для каждого из них можно

написать известную зависимость между звездным временем, прямым восхождением и часовым углом. На рисунке 15 звездное время представлено дугой экватора $E\Upsilon$, истинное солнечное астрономическое время t — дугой EJ , среднее t_m — дугой EC ; прямые восхождения α и α_m истинного Солнца и «среднего солнца» — соответственно дугами ΥJ и ΥC . Из чертежа видно, что

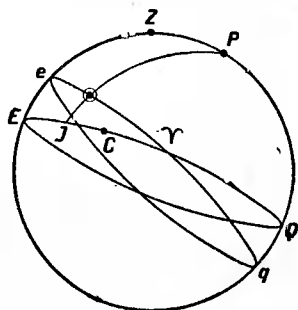


Рис. 15. «Среднее солнце» и истинное Солнце

$$\begin{aligned} s &= t + \alpha & t + \alpha &= t_m + \alpha_m \\ s &= t_m + \alpha_m & t_m - t &= \alpha - \alpha_m. \end{aligned}$$

Последнее равенство показывает, что уравнение времени может быть выражено разностью прямых восхождений истинного Солнца и «среднего солнца».

По правилам теоретической астрономии вычисляется точное значение уравнения времени для любого момента. В астрономических календарях дается значение уравнения времени для начала каждых суток или прямо — гражданское время в момент истинного полудня. Приводим здесь график изменения уравнения времени в течение года. На рисунке 16 изображены три кривые, причем по горизонтальной оси отложены даты, по вертикальной — значение уравнения времени в минутах. Пунктирная кривая отражает влияние неравномерности видимого движения Солнца по эклиптике и представляет измерение разности прямых восхождений центра истинного Солнца и среднего эклиптического солнца, которые совпадают около 3 января, когда Земля проходит через перигелий. В это время указанная разность (уравнение от эксцентриситета) равна нулю. После этого она возрастает в течение

трех месяцев, пока истинные сутки сравниваются со средними, затем уже разность начнет убывать, дойдя опять до нуля через полгода (около 5 июля, когда истинное Солнце имеет наименьшую скорость видимого движения). В дальнейшем это уравнение становится отрицательным, проходя через минимум в начале октября и обращаясь снова в нуль к началу следующего года. Прерывистой кривой изображено влияние одного лишь наклона эклиптики на уравнение времени. Эта кривая имеет четыре нулевые точки в дни равноденствий и солнцестояний. Уравнение времени, связанное со средним экваториальным солнцем, изображено сплошной кривой, суммирующей оба указанных выше влияния. Оно четыре раза в

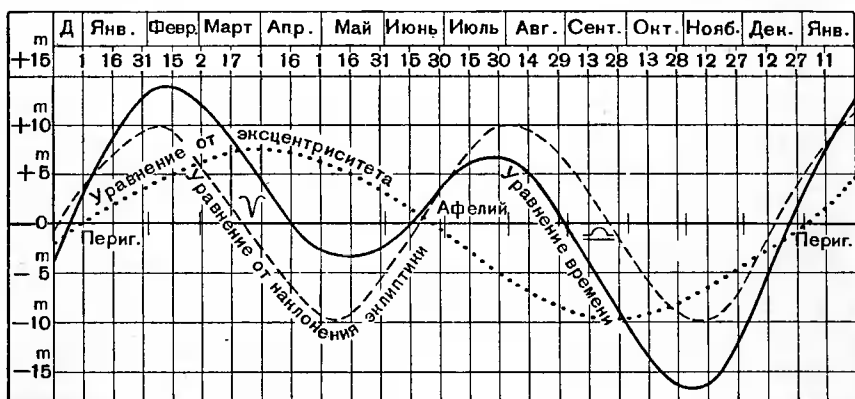


Рис. 16. График уравнения времени

году обращается в нуль, причем эти моменты не совпадают ни с днями равноденствий, ни с днями солнцестояний, а именно: 15 апреля, 14 июня, 1 сентября и 24 декабря. В промежутках между этими моментами оно бывает или положительным, или отрицательным. Наибольшее расхождение среднего и истинного времени (-16^m23^s) относится к 3 ноября.

§ 13. Всемирное, поясное и декретное время. Время и долгота. В различных местах на Земле, лежащих к востоку или к западу друг от друга, кульминации одного и того же светила наступают в разные моменты: в восточных раньше, чем в западных (вследствие вращения Земли с запада на восток), так что разница в географических долготах на 15° соответствует разнице моментов наступления начала суток на 1 час. Все места, лежащие на одном меридиане, имеют одинаковое местное время, а для точек, находящихся на разных меридианах, *разность их местных времен равна разности долгот, выраженных в часовой мере.* На этом основано определение географической долготы места: чтобы определить географическую долготу одного места относительно другого, до-

статочно сравнить их точно определенные местные времена. В каждом из рассмотренных до сих пор способов измерения времени к терминам: «звездное», «истинное», «среднее» и «гражданское» можно прибавить «местное время», так как начало суток во всех них определяется моментом кульминации в данном месте. Долгота Москвы от Гринвича $2^{\text{ч}} 30^{\text{м}} 17^{\text{с}}$ к востоку; Пулково имеет $2^{\text{ч}} 1^{\text{м}} 18^{\text{с}}$ восточной, или положительной, долготы, и разница их местных времен от гринвичского выражается в тех же числах.

При развитии производительных сил, росте международной торговли, а в связи с этим и при развитии техники сношений давно уже стало ощущаться неудобство большого разнобоя в счете времени. Для устранения этого неудобства в конце XIX в. было введено так называемое *поясное время*. Поверхность земного шара была разделена на 24 пояса меридианами через каждые 15° по долготе. Во всех местах, лежащих в пределах данного пояса, был введен один и тот же счет времени, совпадающий с местным временем меридиана, проходящего по середине пояса. В таком случае разница между поясным и местным временем не превосходит получаса. Средним меридианом начального, или нулевого, пояса был принят гринвичский меридиан, т. е. тот же, который принят начальным и для отсчета долгот. Средний меридиан I пояса лежит к востоку от гринвичского на 15° , II пояса — на $2 \times 15^{\circ} = 30^{\circ}$ к востоку и т. д. Следовательно, время I пояса впереди гринвичского на 1 час, II пояса — на 2 часа и т. д. Номер пояса показывает и разницу времени этого пояса с гринвичским в часах, минуты же и секунды в каждый момент во всем мире считаются одинаковыми.

Такой счет времени принят на международной конференции в 1884 г. с участием 26 государств. Новый способ счета времени тогда получил название универсального или стандартного и стал постепенно вводиться во всех западных странах. В нашей стране царская власть в союзе с церковниками оказалась враждебной и к таким реформам. Уже после Великой Октябрьской социалистической революции, перевернувшей все основы жизни в интересах трудящихся, вопрос введения более рационального счета времени нашел и у нас свое разрешение: 8 февраля 1919 г. был издан декрет «О введении нового счета времени по международной системе часовых поясов».

Среднее время начального пояса, или время меридиана, проходящего через Гринвич — место астрономической обсерватории близ Лондона, отсчитываемое от полуночи, называется *всемирным* (или *мировым*) *временем*. Во всемирном времени принято выражать данные, приводимые в астрономических календарях.

Практические соображения заставляют проводить границы поясов не везде точно по меридианам, а по государственным границам или по пограничным линиям отдельных областей, по природным границам, горным хребтам, рекам и т. п. Например, II пояс, в котором находятся Москва, Ленинград, Киев и ряд других центров,

имеет с запада границу, идущую по нашей государственной границе. Крайним восточным поясом в пределах СССР является XII пояс, имеющий восточную границу в основном по меридиану $187^{\circ},5$. Таким образом, Союз Советских Социалистических Республик простирается на одиннадцать часовых поясов, т. е. опоясывает по долготе почти половину земного шара. Для правильного отнесения того или иного места к часовому поясу нужно обращаться к карте (рис. 17) или к описанию границ часовых поясов.

За время, прошедшее с 1919 г., существенно изменилась экономика нашей страны и образовались близко экономически связанные районы, находившиеся в разных часовых поясах, даже некоторые сильно разросшиеся города, как Новосибирск, оказались разделенными на две части границей между соседними поясами. Поэтому Межведомственная комиссия единой службы времени при Комитете стандартов Совета Министров СССР составила новое распределение территории Союза по часовым поясам, воспроизведенное на рисунке 17.

Надо еще заметить, что во всем СССР правительственным декретом от 16 июля 1930 г. часовая стрелка переведена на час вперед, так что каждый пояс на территории СССР живет по времени, следующего пояса к востоку. Например, в Москве и всех местах, отнесенных ко II поясу, часы впереди гринвичских не на 2 часа, а на 3 часа. Это так называемое *декретное время*. Оно введено для экономии электроэнергии и более рационального ее распределения в течение суток: днем в большей степени на производство, вечером — на освещение и культурные потребности.

Все указанные решения Советского правительства были подтверждены постановлением Совета Народных Комиссаров Союза ССР от 9 февраля 1931 г.

Движение поездов, пароходов и самолетов производится по всей территории Союза ССР по декретному времени г. Москвы, точно так же, как и отметки о времени на телеграммах.

Зависимость между географической долготой и местным временем может быть выражена так: *разность долгот двух мест на Земле, измеряемых в часовой мере, равна разности местных времен*. Это дает возможность по времени одного места вычислить время другого места, если известна разность долгот их, а также по разности местных времен найти долготу одного места, если известна долгота другого места.

Долгота считается от начального меридиана к востоку от 0 до 360° , или до 24° , а иногда различается восточная и западная долгота от 0 до 180° , или до 12° (в СССР положительной считается восточная долгота, а по международному счету долгот — западная).

Например, Москва относится ко II поясу, а долгота Москвы $37^{\circ},5$, или $2^{\circ}30'$. Средний меридиан II пояса соответствует долготы 30° , или 2° . Следовательно, местное время в Москве отличается от поясного на полчаса, причем местное впереди поясного, так

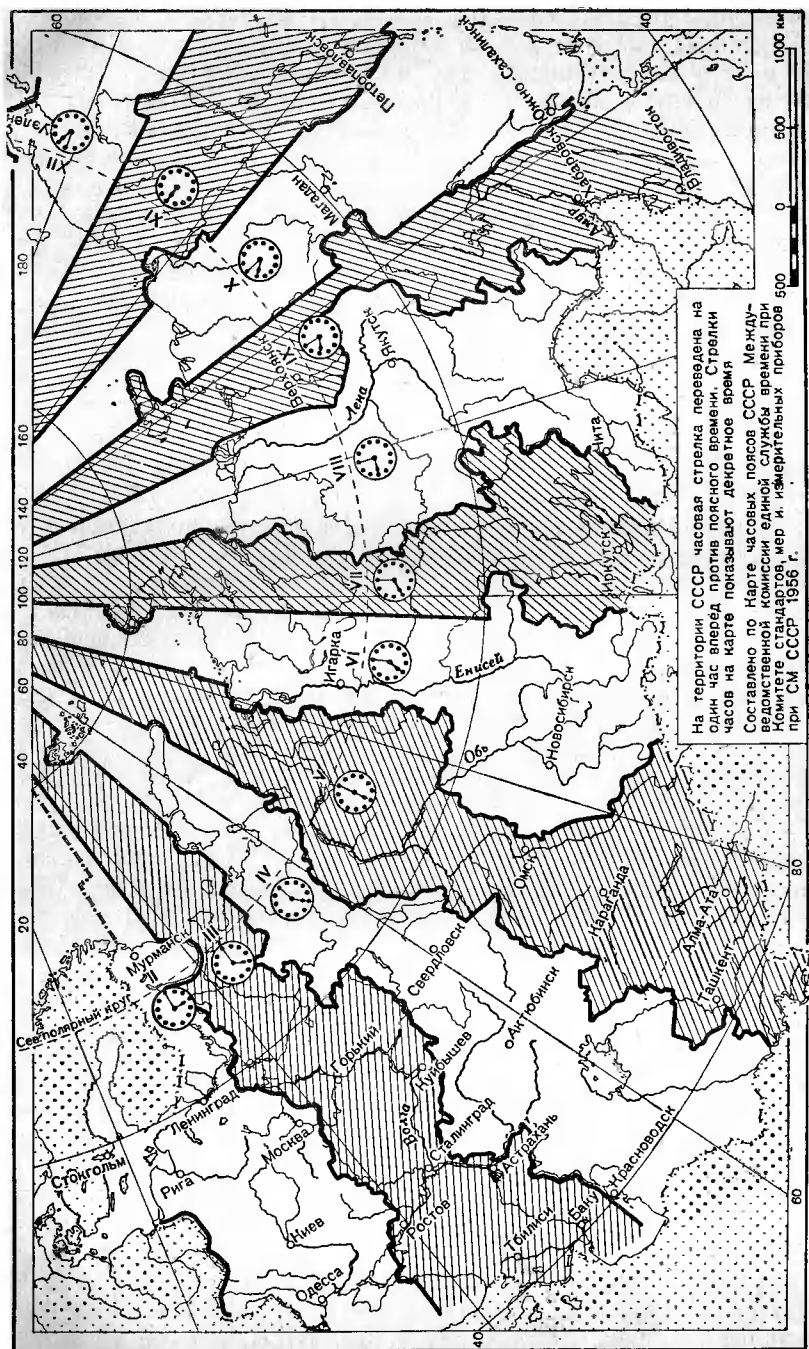


Рис. 17. Карта часовых поясов

как Москва расположена восточнее среднего меридиана. В обиходе часто время II пояса называют «московским временем», но здесь имеют в виду не местное время Москвы, а поясное, и именно II пояса, да еще с переводом стрелки на час вперед, значит, III пояса, по которому считается декретное время в Москве. Время же II пояса близко к местному времени в Ленинграде, отличаясь от него на 1 минуту.

Вообще же, если обозначить поясное время через T_n , местное время — через T_m , всемирное время — через T_0 , декретное время — через T_d , солнечное время — через $T_{\text{ист}}$, номер пояса — через n , долготу места — через λ и уравнение времени — через η , то зависимость между ними выразится формулами:

$$T_m = T_{\text{ист}} + \eta,$$

$$T_n = T_0 + n = T_m - \lambda + n,$$

$$T_d = T_n + 1^h.$$

Например, 10 часов вечера, или 22^h , в Москве по декретному времени соответствует 21^h поясного, 19^h всемирного, $21^h + 2^h 30^m - 2^h = 21^h 30^m$ местного времени.

Положим, 1 октября в Москве отмечен момент полудня (наиболее короткой тени). Это соответствует 12^h истинного солнечного времени. Уравнение времени 1 октября отрицательное и равно -10^m . Точное показание часов, идущих по декретному времени, должно быть в этот момент:

$$T_d = 12^h - 10^m - 2^h 30^m + 2^h + 1^h = 12^h 20^m.$$

§ 14. Линия изменения даты. Известно, что участники первой кругосветной экспедиции Магеллана в начале XVI в., вернувшись, с удивлением убедились в том, что они в своем счете дней и чисел месяца разошлись с жителями, оставшимися на месте, ровно на одни сутки. Так оно и должно было случиться. Дело в том, что человек, отправившийся в восточном направлении, например из Москвы, и приехавший до полуночи, положим, в Свердловск (IV пояс), начал сутки с москвичами, а закончил их со свердловчанами. Но у свердловчан полночь наступает на 2 часа раньше, чем у москвичей. Таким образом, у нашего путешественника сутки окажутся продолжительностью не 24 часа, а 22 часа. Продолжая таким образом путь вокруг Земли, путешественник вернется в Москву, опередив москвичей, оставшихся на месте, на целые сутки в своем счете. Если бы он отправился из Москвы не к востоку, а к западу, то он опаздывал бы в своем счете и, объехав Землю вокруг, отстал бы на целые сутки. Представим себе теперь, что мы имеем на начальном меридиане полночь с 21 на 22 марта. В то же время в I поясе 1 час утра 22 марта, а в XXIII поясе 11 часов вечера 21 марта; во II поясе — 2 часа утра 22 марта, а в XXII поясе — 10 часов

вечера 21 марта и т. д. Мы придем к тому, что на среднем меридиане XII пояса (долгота — 180°) будет с одной стороны 12 часов дня 22 марта, с другой стороны 12 часов дня 21 марта. Это, следовательно, такой меридиан на Земле, по обе стороны которого соседние места должны считать разные числа, отличающиеся на одни сутки. На нем прежде всех мест на Земле начинается каждое новое число месяца. Этот 180-й меридиан от Гринвича проходит как раз между Азией и Америкой по Тихому океану, т. е. по наименее населенному месту. К нему и отнесена та линия, при переходе через которую должна быть изменена дата по следующим мореходным правилам:

1) корабль, направляющийся к востоку, с полуночи, следующей за переходом через линию изменения даты, повторяет свою дату; например, после 5-го числа считает опять 5-е;

2) корабль, направляющийся к западу, в полночь, следующую за переходом через линию изменения даты, меняет дату сразу на две единицы, пропускает следующее число, например, после 4-го считает не 5-е, а сразу 6-е.

Практически *линия изменения даты* (называемая иногда *демаркационной линией*) проходит не только по 180-му меридиану, а местами уклоняется, огибая острова, и пр., и, таким образом, она вся проходит по воде, не пересекая суши.

§ 15. Календарь. Для измерения больших промежутков времени издавна был взят период постоянно сменяющихся времен года, связанный с обращением Земли вокруг Солнца. Понятие об этом периоде могло бы дать нам видимое смещение Солнца среди звезд. Время полного обращения Земли вокруг Солнца должно соответствовать промежутку времени, в течение которого Солнце видимым образом завершает круг на небесной сфере, возвращаясь к одной и той же звезде. Этот промежуток времени называли *звездным годом*. Звездный год равен $365,25636$ средних солнечных суток, или $365^d 6^h 9^m 9^s$ (с точностью до 1^s). Мы знаем, что времена года связаны с положением Солнца по отношению к экватору и с прохождением его через основные точки на эклиптике: весеннее равноденствие, летнее солнцестояние, осеннее равноденствие и зимнее солнцестояние. Весь цикл смены времен года завершается, когда Солнце возвращается в точку весеннего равноденствия, и если бы точка весеннего равноденствия занимала всегда неизменное положение среди звезд, то смена времен года происходила бы как раз в течение звездного года. Но еще греческий астроном Гиппарх во II в. до н. э. открыл явление так называемой *прецессии, или предварения равноденствий*, заключающееся в том, что точки равноденствий сами смещаются среди звезд очень медленно в сторону запада, т. е. навстречу движению Солнца по эклиптике. Стало быть, Солнце встретит точку весеннего равноденствия несколько раньше, чем вернется к той же звезде.

Промежуток времени между двумя последовательными прохождением центра Солнца через точку весеннего равноденствия называется тропическим годом.

Каждый год точка весеннего равноденствия смещается по эклипке приблизительно на $50''$, так что полный обход равноденственными точками всех зодиакальных созвездий совершается в $(360 \cdot 60 \cdot 60) : 50 = 26\,000$ лет. Продолжительность тропического года составляет $365,2422$ суток (с точностью до $0,0001$), или $365^{\text{д}} 5^{\text{ч}} 48^{\text{м}} 46^{\text{с}}$, т. е. он короче звездного приблизительно на 20 минут. Мерой гражданского летосчисления принимается тропический год.

Определенная система счисления значительных промежутков времени с подразделением на отдельные периоды (годы, месяцы, дни) разумеется обычно под одним словом «календарь». Самое слово происходит от латинского слова «calendae» — первое число месяца, которое произошло от греческого — «провозглашать». Дело в том, что в древнем Риме при постоянном расхождении календарного счета с наступавшими временами года право следить за учетом времени принадлежало жрецам, провозглашавшим народу наступление нового года; при этом они делали всякие вставки в календарь по своему произволу, исходя из интересов властителей и для выжимания налогов с народных масс.

Особенность измерения времени сравнительно с измерением других величин (длины, веса и пр.) заключается в том, что во всех других случаях установлена одна основная единица (метр, грамм и пр.), а большие или меньшие меры берутся в целом кратном к ней отношении, тогда как сутки и год определяются периодической повторяемостью природных явлений, связанных с движением Земли. Каждый из этих периодов независим друг от друга, и между ними нет простых отношений. Сутки не только не содержатся целое число раз в году, но и несоизмеримы с ним. Вследствие этого невозможно установить такого календаря, который совершенно точно согласовался бы с движениями Земли. Отсюда и возникали различные календари у разных народов и в разные времена, отсюда и попытки исправлений и усовершенствований календарей.

Появление календаря и его последующее усовершенствование тесно связаны с производственными потребностями и развитием хозяйственно-экономической жизни. Но на всей истории календаря сказались также религиозные и мифические наслоения, искажавшие истинный характер и назначение летосчисления (связь с днями, посвящаемыми различным божествам, установление различных обрядов, назначение религиозных праздников и т. д.). Колыбелью главнейших календарей явились такие страны древности, как Египет, Вавилон, где земледелие достигло большого расцвета, а затем Греция и Рим.

Все эти системы можно разделить на три главных типа: солнечные, лунные и лунно-солнечные. В основе солнечного календаря лежит продолжительность солнечного (тропического) года, в основе лунного календаря лежит продолжительность лунного (синодического) месяца, а в лунно-солнечном календаре стремятся скомбинировать то и другое.

Современный календарь, принятый в громадном большинстве культурных стран, является солнечным календарем. Впервые солнечный календарь сложился около семи тысяч лет назад в Египте. Все благосостояние Египта было основано на системе сооружений, создававшихся и поддерживавшихся рабским трудом для сохранения благодатных вод и ила, приносимых разливавшейся один раз в году рекой Нилом. С разлива Нила и начинался счет нового хозяйственного года в Египте. Было подмечено, что приближение разлива Нила совпадало с появлением самой яркой звезды Сириуса после периода ее невидимости. Жрецы, заметив восход Сириуса, «возвещали» народу о наступлении этого важнейшего события в хозяйственной жизни страны.

Календарь у римлян в своем первоначальном виде был очень путаный и давал простор для произвола жрецов. Сначала год состоял из 10 месяцев и содержал 304 дня, затем добавлено 2 месяца и год увеличен до 355 дней. Наконец, помимо года в 355 дней, вводились годы в 377 и 378 дней со вставным добавочным месяцем. Все религиозные праздники древнего Рима были приурочены к тем или иным моментам в земледельческой жизни — празднику жатвы, сбору винограда и т. п. Неправильность календаря нарушала весь распорядок, запутывала сроки взимания налогов и, между прочим, привела к тому, что праздник жатвы с течением времени стал приходиться на зиму. Все это вызывало необходимость коренной реформы календаря, которая и была произведена в 46 г. до начала нашей эры римским правителем Юлием Цезарем с помощью александрийского астронома Созигена, несомненно, знакомого с египетским календарем. Созиген предложил принять среднюю продолжительность тропического года в $365\frac{1}{4}$ суток. А чтобы каждый год содержал целое число суток, решено три года считать по 365 суток, четвертый же — в 366 суток. Так были установлены *простые* и *високосные* годы. Самое слово *високосный* есть искаженное латинское слово «bissextilis» — вторичный шестой.

В *юлианском календаре*, отличающемся большой простотой, совершенно отброшен счет времени по Луне. Деление на месяцы оставлено таким, каково оно было в древнем римском календаре, по 30 и 31 дню, за исключением февраля с 28 днями. Такими существуют месяцы и до настоящего времени. Название месяцев имело отчасти производственное, отчасти религиозное происхождение, а то и просто брались порядковые числительные, как сентябрь — September (septem — семь), октябрь — October (octo — восемь), ноябрь — November (novem — девять), декабрь — December (decem — десять).

От вавилонян дошла до нашего времени семидневная неделя, которая не имеет такого астрономического происхождения, как сутки, месяц и год, но самые названия дней недели на латинском языке, а также сохранившиеся и на западноевропейских языках указывают на связь их с планетами, к которым причисляли древние также Солнце и Луну и насчитывали их семь.

Неточность юлианского года выражается разностью 365,25 — 365,2422 = 0,0078 суток, или $11^m 14^s$. За 1000 лет накапливается ошибка в 7,8 суток, или за каждые 400 лет почти трое суток. Так как юлианский год длиннее истинного, то новый календарный год каждый раз начинается с запозданием, и момент весеннего равноденствия наступает все в более ранние числа по календарному счету, т. е. если он был в каком-нибудь году 10 марта, то через 1000 лет будет уже 2 марта. Особенно большого практического значения эта разница не имеет, но опять-таки затруднения в назначении религиозных праздников, теперь уже христианской пасхи, послужили поводом к новому исправлению календаря, произведенному распоряжением римского папы Григория XIII в 1582 г. Дело в том, что по решению так называемого Никейского вселенского собора (325 г.) пасха должна праздноваться в первое воскресенье после полнолуния, следующего за днем весеннего равноденствия. Это, между прочим, указывает на производственное происхождение самого праздника пасхи, связанного с наступлением весны, оживлением природы и началом весенних работ.

В год Никейского собора весеннее равноденствие приходилось на 21 марта, что соответствовало началу весны, а к 1582 г. равноденствие приходилось уже на 11 марта. Чтобы исправить накопившуюся ошибку в 10 суток, приказано было день, следовавший за 4 октября 1582 г., считать не 5, а 15 октября. В дальнейшем был сохранен тот же счет с простыми и високосными годами, как и по юлианскому календарю, но для устранения накапливающейся ошибки за каждые 400 лет в 3 суток введено дополнение к правилу счета годов, простых и високосных, при котором за это время три високосных года по юлианскому календарю считаются простыми по новому календарю. Это правило заключается в следующем: *високосными годами считаются те, числа которых делятся без остатка на 4, за исключением годов, у которых числа оканчиваются двумя нулями; такие годы считаются високосными только в том случае, если число сотен делится на 4*. Таким образом, 1600 год остался високосным, а годы 1700, 1800 и 1900 считались по новому календарю простыми, тогда как по старому они високосные. Значит, к XX веку разница между новым календарным счетом и старым, юлианским, стала 13 суток. Новый способ счета времени и получил название *григорианского календаря, или нового стиля*.

Новый стиль был введен тогда же в большинстве западноевропейских стран, но Англия запоздала почти на 200 лет и ввела его только в 1752 г. После этого *старый стиль* продолжал еще применяться в России, Греции и других балканских государствах. С развитием международных сношений, науки и техники, почты, телеграфа пришлось и России пользоваться новым стилем. Но он входил в жизнь только вторым, параллельным счетом. Царское правительство и тесно связанная с ним церковь всячески сопротивлялись переходу полностью на новый стиль, и Временное правительство после Февральской революции не хотело и не смело

посягнуть на старые устои. Только после Великой Октябрьской социалистической революции советская власть, отделившая церковь от государства и уничтожившая какое бы то ни было ее влияние, легко и просто разрешила вопрос о календаре: 25 января 1918 г. был издан декрет о переводе летосчисления на новый стиль, по которому предписано вместо 1 февраля 1918 г. считать 14 февраля.

Новый стиль, конечно, не является совершенно точным, но ошибка в одни сутки накопится по нему только через 3300 лет. Это видно из того, что средняя продолжительность григорианского года $365^{\text{д}} 5^{\text{ч}} 49^{\text{м}} 12^{\text{с}}$, а истинного — $365^{\text{д}} 5^{\text{ч}} 48^{\text{м}} 46^{\text{с}}$, т. е. разница всего 26 секунд.

Чтобы перевести дату какого-нибудь события по юлианскому календарю на новый стиль, надо прибавить к юлианской дате столько дней, какова была разница между новым и старым стилем в том столетии, в котором совершилось это событие. Например, дата рождения В. И. Ленина — 10 апреля 1870 г. по старому стилю, по новому стилю — это 22 апреля, так как в XIX в. ошибка старого стиля составляла 12 дней.

Несовершенство современного календаря лежит практически в нецелесообразном подразделении календарного года на месяцы и недели.

Перед второй мировой войной был разработан проект календаря, в котором предлагалось делить год на 4 квартала, в каждом из них считать первый месяц в 31 день, два другие — по 30 дней, а всего в квартале 91 день, в четырех кварталах 364 дня. Неделя должна была остаться семидневной, причем любой квартал насчитывал бы 13 недель. В конце каждого года предлагалось вставлять дополнительный день, который должен быть международным нерабочим днем без числа и месяца и без наименования дня недели. В високосные же годы предлагалось вставлять подобный же дополнительный день в конце II квартала.

§ 16. Эра и счет годов. Принятая в настоящее время в большинстве стран эра, или начало счета годов, введена сравнительно недавно: появилась она вообще лет 500 спустя после года, принятого за начало счета, т. е. после так называемого рождества Христова, а в России введена только при Петре I с 1700 г. В последний период Римской империи была распространена эра Диоклетиана, где за начало эры взят год провозглашения Диоклетиана императором (284 г. н. э.). В течение более пяти веков христианская церковь, возникшая в Римской империи, не имела ни своей эры, ни определенного понятия с времени рождения Христа, якобы, когда-то жившего на Земле.

Определение этой даты принадлежит римскому монаху Дионисию Малому, которому было поручено составить новую таблицу празднования пасхи. Он не хотел делать вычисление по годам «нечестивого и гонителя» Диоклетиана и ввел новую эру, поставив на место 284 г. Диоклетиана 532 г. после рождества Христова. Как он получил это число, он нигде не объяснил, — оно взято им произвольно. Да он и не смог бы этого объяснить, потому что фактически никакого Христа не было: Христос — мифическое лицо. Эра р. Х. не связана ни с каким историческим фактом.

До введения в России этой эры счет годов велся от «сотворения мира», также мифического события, а приказом Петра I 1720 г. от «сотворения мира»

заменен 1700 г. от р. Х. Нужно сказать, что вообще не было какой-нибудь определенной даты «сотворения мира», а насчитывалось их свыше сотни различных.

Для согласования различных систем хронологического счета Скалигером в 1582 г. был предложен так называемый юлианский период, заключающий в себе 7980 юлианских годов, число, связанное с повторяемостью календарных дат (дней недели, начала года и пр.). Этот период дает возможность определить год какого-нибудь события, если в исторических источниках есть указание на день недели и пр., а тем самым ввести порядок в хронологию и согласовать различные эры. Началом юлианского периода принято 1 января 4713 г. до н. э. Такой счет широко применяется в астрономических вычислениях и выражается обычно числом дней от начала юлианского периода, или юлианской эпохи. Например, 1 января 1958 г. соответствует 2 436 204 юлианскому дню.

§ 17. Лунные и лунно-солнечные календари. Кроме юлианского и григорианского календарей, основанных на тропическом годе, различные народы пользуются (преимущественно пользовались в древности) и другими календарями, главным образом лунным, т. е. основанными не на движении Солнца, а на движении Луны.

Например, магометане пользуются лунным годом, который состоит из 12 лунных месяцев. Их год считается то в 354, то в 355 суток; в периоде 30 лет имеется 19 лет по 354 дня и 11 лет по 355 дней и средняя продолжительность лунного календарного года равна $(354 \times 19 + 355 \times 11) : 30 = 354,36667$ дней $= 354^d 8^h 48^m 0^s$. Сравним это с точными числами; истинная средняя продолжительность лунного месяца равна $29^d 12^h 44^m 29^s$, и, значит, истинная продолжительность лунного года равна 12 лунным месяцам $= 354^d 8^h 48^m 34^s,8$; таким образом, магометанский календарь согласуется с движением Луны лишь немного менее точно, чем григорианский календарь с движением Солнца.

Еврейский календарь еще сложнее магометанского; в нем наряду с лунными месяцами имеется и солнечный год, так что этот календарь основан одновременно и на движении Солнца и на движении Луны. В основу положен лунный месяц, лунный год имеет то 12 месяцев (354 дня), то 13 месяцев (384 дня). Кроме того, имеются недостаточные (353 дня и 383 дня) и избыточные (355 дней и 385 дней) годы. Комбинацией всех этих годов достигается то, что средняя продолжительность календарного года весьма точно приближается к продолжительности тропического года.

§ 18. Сферический треугольник. При решении многих вопросов в сферической и практической астрономии необходимо бывает положения светил, определенные координатами одной системы, выразить в другой системе. Например, практически удобнее непосредственно измерить высоту и азимут светила, а чтобы нанести его положение на звездную карту, надо знать склонение и прямое восхождение.

Связь между высотой и склонением очень просто получается, когда светило кульминирует, т. е. находится в меридиане. В этом случае круг высоты и круг склонения лежат в одной плоскости, и нужная нам связь выражается, как мы видели, формулой:

$$h = \delta + 90^\circ - \varphi \text{ или } \varphi = \delta \pm z.$$

Эта формула служит и для определения широты места. Но если светило не находится в меридиане, то эта формула уже неприменима. В этом случае круг высоты, круг склонения и меридиан, пересекаясь, образуют треугольник на сфере, сторонами ко-

торого служат дуги больших кругов (см. рис. 19). Для вывода зависимости между координатами надо решить сферический треугольник.

К сферическому треугольнику мы не можем применить формул плоской тригонометрии, так как по своим свойствам он отличается от плоского треугольника. Углом сферического треугольника мы называем угол между касательными к его сторонам в вершине или измеряемый им двугранный угол между плоскостями больших кругов, образующих стороны сферического угла. Сумма углов сферического треугольника всегда больше 180° . Это следует из того, что в трехгранном угле сумма его двугранных углов больше $2d$ и меньше $6d$. Плоскости же больших кругов, образующих сферический треугольник, составляют трехгранный угол с вершиной в центре (рис. 18).

Стороны сферического треугольника, очевидно, численно равны плоским углам трехгранного. А так как сумма плоских углов трехгранного угла меньше четырех прямых, то сумма сторон сферического треугольника меньше 360° .

Свойства и способы решения сферических треугольников составляют предмет особого отдела математики — сферической тригонометрии. Для наших целей достаточно иметь лишь несколько основных формул, связывающих стороны и углы сферического треугольника, причем мы можем удовлетвориться случаем, когда стороны его не превосходят 90° .

В сферическом треугольнике ABC соединим каждую вершину с центром сферы O радиусами R . Из вершины A проведем касательные AD и AE к сторонам b и c до пересечения с продолженными радиусами OC и OB , каждый из которых лежит в одной плоскости с соответствующей касательной. Соединив точки пересечения D и E , будем иметь, таким образом, плоские косоугольные треугольники ADE и ODE с общей стороной DE . По правилам элементарной геометрии мы можем написать:

$$DE^2 = OD^2 + OE^2 - 2OD \cdot OE \cdot \cos DOE.$$

$$DE^2 = AD^2 + AE^2 - 2AD \cdot AE \cdot \cos A.$$

Вычитая из первого равенства второе, находим:

$$0 = OD^2 - AD^2 + OE^2 - AE^2 - 2OD \cdot OE \cdot \cos DOE + 2AD \cdot AE \cdot \cos A.$$

Переносим предпоследний член правой части уравнения в левую:

$$2OD \cdot OE \cdot \cos DOE = OD^2 - AD^2 + OE^2 - AE^2 + 2AD \cdot AE \cdot \cos A.$$

Из прямоугольных треугольников OAD и OAE получаем:

$$OD^2 - AD^2 = R^2; \quad OE^2 - AE^2 = R^2; \quad \angle DOE = a;$$

$$OD = \frac{R}{\cos b}; \quad OE = \frac{R}{\cos c}; \quad AD = R \operatorname{tg} b; \quad AE = R \operatorname{tg} c.$$

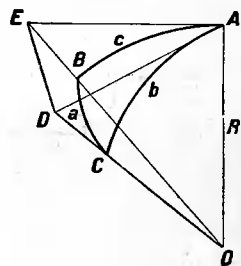


Рис. 18. Сферический треугольник

После подстановки всех этих значений находим:

$$2 \frac{R^2}{\cos b \cos c} \cos a = 2R^2 + 2R^2 \frac{\sin b \sin c}{\cos b \cos c} \cos A.$$

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A. \quad (1)$$

Мы получили формулу, определяющую косинус стороны сферического треугольника по двум другим сторонам и противолежащему углу. Аналогичную формулу можно написать для любой стороны треугольника.

Пользуясь уже полученной формулой, можем вывести новое соотношение, в которое входят синусы сторон и углов сферического треугольника. Решим равенство (1) относительно $\cos A$:

$$\cos A = \frac{\cos a - \cos b \cos c}{\sin b \sin c}.$$

Возводим обе части равенства в квадрат и вычитаем из 1:

$$1 - \cos^2 A = \frac{\sin^2 b \sin^2 c - (\cos a - \cos b \cos c)^2}{\sin^2 b \sin^2 c};$$

$$\sin^2 A = \frac{(1 - \cos^2 b)(1 - \cos^2 c) - (\cos a - \cos b \cos c)^2}{\sin^2 b \sin^2 c};$$

$$\sin^2 A = \frac{1 - \cos^2 a - \cos^2 b - \cos^2 c + 2 \cos a \cos b \cos c}{\sin^2 b \sin^2 c}.$$

Делим обе части равенства на $\sin^2 a$:

$$\frac{\sin^2 A}{\sin^2 a} = \frac{1 - \cos^2 a - \cos^2 b - \cos^2 c + 2 \cos a \cos b \cos c}{\sin^2 a \sin^2 b \sin^2 c}.$$

Получили совершенно симметричную формулу относительно a , b и c . Следовательно, по аналогии можем написать:

$$\frac{\sin^2 B}{\sin^2 b} = \frac{1 - \cos^2 a - \cos^2 b - \cos^2 c + 2 \cos a \cos b \cos c}{\sin^2 a \sin^2 b \sin^2 c};$$

$$\frac{\sin^2 C}{\sin^2 c} = \frac{1 - \cos^2 a - \cos^2 b - \cos^2 c + 2 \cos a \cos b \cos c}{\sin^2 a \sin^2 b \sin^2 c}.$$

Из сравнения трех последних соотношений, имеющих одинаковые правые части, получаем следующие формулы синусов:

$$\frac{\sin A}{\sin a} = \frac{\sin B}{\sin b} = \frac{\sin C}{\sin c}. \quad (2)$$

Выведем еще одно соотношение, взяв две формулы:

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A,$$

$$\cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C.$$

Подставим во вторую формулу выражение $\cos a$ из формулы (1):

$$\cos c = \cos b (\cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A) + \sin a \sin b \cos C.$$

Раскрыв скобки, перенесем первый член правой части в левую:

$$\cos c (1 - \cos^2 b) = \cos b \sin b \sin c \cos A + \sin a \sin b \cos C.$$

Заменяя $(1 - \cos^2 b)$ через $\sin^2 b$, сократим на $\sin b$:

$$\begin{aligned}\cos c \sin b &= \cos b \sin c \cos A + \sin a \cos C, \\ \sin a \cos C &= \sin b \cos c - \cos b \sin c \cos A.\end{aligned}\quad (3)$$

Мы получили формулу, определяющую произведение синуса стороны на косинус прилежащего угла, или формулу пяти элементов.

Таким образом, имеем следующие три группы формул сферического треугольника:

$$\left. \begin{aligned}\cos a &= \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A, \\ \cos b &= \cos c \cos a + \sin c \sin a \cos B, \\ \cos c &= \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C,\end{aligned}\right\} \quad (I)$$

$$\frac{\sin A}{\sin a} = \frac{\sin B}{\sin b} = \frac{\sin C}{\sin c}, \quad (II)$$

$$\left. \begin{aligned}\sin a \cos C &= \sin b \cos c - \cos b \sin c \cos A, \\ \sin b \cos A &= \sin c \cos a - \cos c \sin a \cos B, \\ \sin c \cos B &= \sin a \cos b - \cos a \sin b \cos C.\end{aligned}\right\} \quad (III)$$

Получим еще формулу для прямоугольного сферического треугольника. Полагая в предпоследней формуле

$$B = 90^\circ \quad \text{и} \quad \cos B = 0,$$

получаем:

$$\sin b \cos A = \sin c \cos a.$$

Разделим обе части этой формулы на $\sin a$ и заменим $\frac{\sin b}{\sin a}$ через $\frac{\sin B}{\sin A}$

$$\operatorname{tg} a = \sin c \cdot \operatorname{tg} A \quad \text{или} \quad \frac{\operatorname{tg} a}{\operatorname{tg} A} = \sin c,$$

т. е. отношение тангенсов катета и противолежащего угла равно синусу другого катета

§ 19. Параллактический треугольник. Преобразование координат. Меридиан, круг высоты и круг склонения, взаимно пересекаясь, образуют сферический треугольник с вершинами: зенит Z , полюс мира P и светило S (точнее — центр светила) (рис. 19). Треугольник этот носит название астрономического, или *параллактического* (от греческого слова «parallaxis» — смещение); вид этого треугольника для одного и того же светила и момента изменяется от пере-

мены места наблюдения, т. е. взаимного положения P и Z . Сторонами этого треугольника служат:

$$\cup ZP = 90^\circ - \varphi, \cup ZS = z,$$

$$\cup PS = 90^\circ - \delta.$$

Так как азимут отсчитывается от южной стороны меридиана, то внутренний угол при вершине Z есть дополнение азимута до 180° : $\angle Z = 180^\circ - A$. Угол при вершине P есть не что иное, как часовой угол светила: $\angle P = t$. Третий угол при вершине S носит название *параллактического угла* и обозначается буквой p .

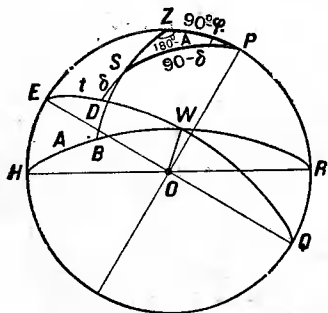


Рис. 19. Параллактический треугольник

Мы видим, таким образом, что элементами параллактического треугольника служат как горизонтальные координаты z и A , так и экваториальные δ и t . Пользуясь выведенной группой формул для сферического треугольника и применив их к параллактическому, мы получим нужные соотношения для перехода от одной системы координат к другой.

Пример. По данным экваториальным координатам δ и α найти горизонтальные координаты z и A для определенного момента времени и места наблюдения.

По звездному времени данного момента и прямому восхождению светила вычисляем часовой угол t :

$$t = s - \alpha.$$

Применим формулы параллактического треугольника к искомой стороне z и углу A и сделаем преобразования; получаем:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t,$$

$$\sin z \sin A = \cos \delta \sin t,$$

$$\sin z \cos A = -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t.$$

Эти формулы дают возможность вычислить для любого момента положение светила на небесной сфере по отношению к горизонту и составить таблицу значений азимутов и зенитных расстояний или высот через определенные промежутки времени. Такая таблица носит название *суточной эфемериды светила*.

Надо заметить, что при вычислении угла по тангенсу мы получаем два решения, из которых нужно взять то, которое соответствует данным. Для этого требуется установить, в каком квадранте

следует взять азимут. Так как z не может быть больше 180° , то $\sin z$ всегда положителен, а стало быть, по знакам произведений $\sin z \sin A$ и $\sin z \cos A$ устанавливается квадрант азимута A .

Подобным образом можно решить и обратную задачу: по горизонтальным координатам z и A вычислить экваториальные α и δ .

§ 20. Вычисление моментов и мест восхода и захода светил. При восходе и заходе светило находится на горизонте, и в этом случае его зенитное расстояние равно 90° .

Взяв формулу, связывающую зенитное расстояние и часовой угол, и полагая $z = 90^\circ$, получаем:

$$\cos z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos t,$$

$$0 = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos t,$$

$$\cos t = -\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi.$$

Вычисляя t по косинусу, получаем два значения: $t_1 = +t$ и $t_2 = -t$. Положительное значение соответствует заходу, отрицательное — восходу. Это станет ясным, если припомнить, что отсчет часовых углов ведется от южной стороны меридиана к западу.

Звездное время восхода и захода получится:

$$s = \alpha \pm t.$$

Для вычисления места восхода и захода берем формулу косинуса стороны, в которую входит азимут светила, и полагая $z = 90^\circ$.

$$\sin \delta = \sin \varphi \cos z - \cos \varphi \sin z \cos A,$$

$$\sin \delta = -\cos \varphi \cos A,$$

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi}.$$

Этому уравнению удовлетворяют два значения: A и $360^\circ - A$. Первое значение для захода, второе — для восхода по тем же соображениям, как и при вычислении моментов t_1 и t_2 .

Представим формулы часового угла и места восхода и захода в форме:

$$\cos t = -\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} (90^\circ - \varphi)}, \quad \cos A = -\frac{\sin \delta}{\sin (90^\circ - \varphi)}.$$

Так как косинус не может быть больше единицы, то формулы могут иметь силу, а значит, восход и заход светила возможны только при условии $\delta \leq 90^\circ - \varphi$, где берется абсолютная величина δ .

Для Солнца и Луны, имеющих значительные видимые диски, приходится вносить поправку. Так как экваториальные координаты даются для их центра, а восход и заход соответствуют касанию горизонта верхним краем диска Солнца, то при вычислении при-

ближенно можно положить: $z = 90^\circ + R'$, где R' — угловой радиус диска в минутах дуги (для Солнца, например, в среднем $16'$).

Взяв предельные величины склонения центра Солнца $\pm 23^\circ 27'$, можно рассчитать те крайние широты, где возможны непрерывные полярные день и ночь.

§ 21. Рефракция. Действительные моменты восхода и захода светил, точно так же как и положение светил над горизонтом, вообще более или менее отличаются от теоретически вычисленных по вы-

веденным выше формулам, так как лучи света, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, проходят через атмосферу и в ней преломляются. Плотность атмосферы все увеличивается к поверхности Земли, и луч все более и более отклоняется в одну и ту же сторону по кривой линии так, что направление, по которому он уже попадает в глаз, оказывается значительно отклоненным в сторону зенита (рис. 20).

Угол между направлением, по которому светило видно, и тем направлением, по которому шел луч в безвоздушном пространстве, называется *астрономической рефракцией*.

Рисунок 20 показывает направление луча SA_n от светила, последовательное преломление его в слоях атмосферы и направление MS_1 , по которому это светило видит наблюдатель, находящийся в точке M Земли. Проведя $MS_2 \parallel SA_n$, мы получим $\angle S_1MS_2 = \angle S_1KS$: этот угол и дает астрономическую рефракцию, которую мы обозначим буквой ρ .

Зенитное расстояние z при отсутствии атмосферы должно было бы выражаться углом $ZMS_2 = \angle ZLS$. Вследствие влияния атмосферы видимое зенитное расстояние $z' = \angle ZMS_1$. Из треугольника MLK имеем:

$$z = z' + \rho.$$

Это значит, что видимое зенитное расстояние светила уменьшается на величину ρ . Рефракция как бы поднимает светило над горизонтом. Так как по известным законам преломления света лучи — падающий и преломленный — лежат в одной плоскости с перпендикуляром, то вся траектория луча располагается в вертикальной плоскости, в которой лежат и направления A_nS и MS_1 . Отсюда следует, что рефракция не меняет азимута светила. По тем же законам преломления света, если светило находится в зените, т. е. $z = 0$, преломления луча не происходит, и $\rho = 0$, $z = z' = 0$. Чем ниже светило над горизонтом, тем влияние рефракции больше.

Рефракция зависит от высоты светила над горизонтом, а также от состояния воздуха, главным образом от его плотности, тем-

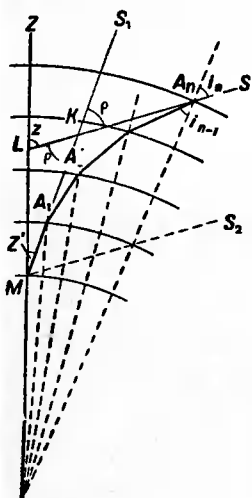


Рис. 20. Схема рефракции

пературы и давления. Точная величина рефракции выражается сложными формулами, выводимыми в специальных курсах. Мы ограничимся приближенной формулой средней рефракции.

Под средней рефракцией разумеют рефракцию, соответствующую средним значениям температуры и давления воздуха в данном месте. Приближенную формулу мы получим, если примем поверхность Земли плоской и атмосферу в нижнем слое с коэффициентом преломления n_1 .

При этих условиях выражение средней рефракции имеет вид:

$$\rho = \frac{n_1 - 1}{\sin 1''} \operatorname{tg} z.$$

Формула показывает, как меняется величина рефракции с зенитным расстоянием светила, обращаясь в нуль при $z = 0$. Коэффициент при $\operatorname{tg} z$ носит название *постоянной рефракции*. Для Пулковы при температуре 0°C и давлении 760 мм постоянная рефракция была принята $60'',25$. При зенитных расстояниях свыше 70° формула дает ошибку больше $1''$ и при дальнейшем приближении к горизонту становится непригодной. В горизонте рефракция около $35'$.

Когда за нормальные условия принимают температуру воздуха 10°C и давление 760 мм ртутного столба, то формула рефракции имеет вид:

$$\rho = 58'',3 \operatorname{tg} z.$$

При данном давлении B и температуре t рефракция вычисляется приближенно по формуле:

$$\rho = 60'',2 \frac{B}{760} \cdot \frac{273}{273 + t} \operatorname{tg} z.$$

В наибольшей степени влияние рефракции сказывается на восходе и заходе светил, когда они находятся на горизонте. Поэтому в полученной нами выше формуле для вычисления моментов восхода и захода Солнца, как и Луны, необходимо учесть не только видимый радиус диска, но и астрономическую рефракцию, которая в данном случае имеет значение от $32'$ до $36'$. С учетом рефракции выражение для зенитного расстояния в момент восхода и захода должно иметь вид:

$$z = 90^\circ + R' + \rho.$$

При средней величине рефракции $35'$ и видимом угловом радиусе Солнца $16'$ численное значение z получается $90^\circ 51'$ и $\cos z = -0,0148$.

По косинусу z вычисляем часовой угол t :

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t,$$

$$\cos t = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta + \sec \varphi \sec \delta \cos z,$$

$$\cos t = -(\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta + 0,0148 \sec \varphi \sec \delta).$$

Так как отсчет часовых углов ведется от южной стороны меридиана, а начало солнечных суток — от нижней кульминации центра Солнца, то для получения момента захода Солнца по местному среднему времени надо к полученному t прибавить 12^h и уравнение времени, а для момента восхода — вычесть t из 12^h и прибавить уравнение времени. Таким образом, вследствие рефракции увеличивается продолжительность дня, так как Солнце раньше восходит и позже заходит, чем следовало бы согласно его геометрическому положению.

Большое практическое значение, в особенности для полярников и зимовщиков, имеет вопрос о непрерывном полярном дне и полярной ночи, о времени их наступления для данного места на Земле. Вопрос приводится к условию, когда Солнце становится незаходящим или невосходящим светилом.

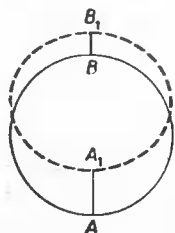


Рис. 21. Изменение формы диска светила вследствие рефракции

Если δ — склонение центра Солнца, R' — видимый угловой радиус его, то склонение верхнего края диска Солнца будет $(\delta + R' + \rho)$. Начало непрерывного полярного дня соответствует тому положению, в котором верхний край Солнца касается горизонта в момент нижней кульминации Солнца. Вспомним соотношение между склонением, зенитным расстоянием и географической широтой в момент нижней кульминации:

$$\delta = 180^\circ - (\varphi + z).$$

В данном случае эта формула принимает вид:

$$\delta + R' + \rho = 180^\circ - (\varphi + 90^\circ),$$

$$\delta = 90^\circ - (\varphi + R' + \rho).$$

Получив, таким образом, для склонения Солнца определенное значение, мы находим по астрономическому календарю соответствующий день года.

Для определения начала полярной ночи надо взять то положение, когда в верхней кульминации зенитное расстояние верхнего края Солнца равно 90° . Берем соотношение между склонением, зенитным расстоянием и широтой места для момента верхней кульминации, когда светило расположено к югу от зенита: $\delta = \varphi - z$.

Применяем ее к данному случаю:

$$\delta + R' + \rho = \varphi - 90^\circ,$$

$$\delta = \varphi - R' - \rho - 90^\circ.$$

Вследствие рефракции происходит видимое изменение формы дисков Солнца и Луны, так как величина рефракции для различных точек диска неодинакова (рис. 21): вертикальные хорды

диска как бы сокращаются в общем пропорционально их длине ($AB > A_1B_1$), и круглый диск обращается в эллипс с малой осью по высоте.

§ 22. Мерцание звезд. Сумерки. С прохождением лучей в атмосфере связано также явление *мерцания звезд*, которое всего заметнее у горизонта и бывает больше или меньше в зависимости от состояния воздуха. Объясняется мерцание тем, что лучи света, проходя через беспокойный воздух с потоками и резкими изменениями плотности, быстро меняют направление вследствие преломления и отклоняются то в ту, то в другую сторону.

В результате для глаза происходит то усиление, то ослабление лучей определенной длины волны, и звезда как бы изменяет блеск и цвет. Планеты мерцают в очень слабой степени, почти незаметно для глаза, и этим отличаются от звезд. Это объясняется тем, что планеты вследствие близости к нам не представляются светящимися точками, а имеют некоторые диски: различные точки диска мерцают в разное время, и общая сумма света остается почти постоянной.

Надо заметить, что у самого горизонта при определенном состоянии атмосферы могут наблюдаться те или другие колебания и игра цвета у планет и даже у Солнца (чаще это наблюдается весной при восходе, когда воздух влажен).

Сумерки, или постепенное ослабление дневного света после захода Солнца, происходят от рассеяния света слоями воздуха, находящимися выше горизонта наблюдателя. Сумерки наблюдаются также и перед восходом Солнца. Если в точке M на Земле (рис. 22) Солнце заходит и начинаются сумерки, то место M_1 освещается только отраженными лучами от верхних слоев атмосферы, а в место M_2 уже не попадают и отраженные лучи — здесь сумерки закончились. Считается, что конец сумерек наступает, когда центр Солнца спускается под горизонт на 18° . Это конец так называемых *астрономических сумерек* — когда наступает полная ночь и на небе появляются самые слабые звезды. А *гражданские сумерки* заканчиваются уже тогда, когда Солнце опускается ниже горизонта на 7° и приходится пользоваться искусственным светом. В авиации имеет значение именно конец гражданских сумерек и считается, что вместе с этим заканчиваются и дневные условия полета.

Если центр Солнца в полночь опускается под горизонт меньше, чем на 7° , гражданские сумерки длятся всю ночь — это так называемые *белые ночи*, которые бывают в СССР летом на севере. Для непрерывающихся всю ночь сумерек нужно, чтобы склонение Солнца

$$\begin{aligned} \delta &\geq 90^\circ - \varphi - 7^\circ \text{ — для гражданских сумерек,} \\ \delta &\geq 90^\circ - \varphi - 18^\circ \text{ — для астрономических сумерек.} \end{aligned}$$

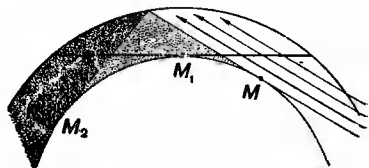


Рис. 22. Гражданские и астрономические сумерки

Наибольшее возможное значение склонения равно $23^{\circ},5$. Следовательно, белые ночи могут быть уже начиная с широты $59^{\circ},5$, а сплошные астрономические сумерки — с широты $48^{\circ},5$.

Продолжительность сумерек зависит от широты места и от времени года. Эта продолжительность может быть вычислена по формуле:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos (t + \tau),$$

в которой τ — продолжительность сумерек, δ и t — склонение и часовой угол Солнца, угол z для астрономических сумерек $90^{\circ} + 18^{\circ} = 108^{\circ}$, для гражданских $90^{\circ} + 7^{\circ} = 97^{\circ}$.

Например, в Москве гражданские сумерки продолжаются от 40^m весной и осенью до $1^h 10^m$ летом и зимой; астрономические — от 2^h до $3^h 15^m$; в Ленинграде — от 45^m весной до $2^h 15^m$ летом.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ОСНОВЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

§ 23. Задачи практической астрономии. Из самого названия практической астрономии следует, что здесь имеются в виду практические методы наблюдений небесных светил, приемы пользования специальными инструментами и практические применения астрономических наблюдений. Но не всякие наблюдения небесных тел мы относим к практической астрономии. В главе VII будут описаны методы астрофизических наблюдений.

В задачи практической астрономии входят: определение координат небесных светил, нахождение точного времени, широты и долготы места на Земле, определение азимута, т. е. угла, который дает расположение стран света, и т. д. Все это необходимо для составления точных географических карт, для решения задач геодезии, для мореплавания и самолетовождения. Из этого уже видно, что данная отрасль астрономии имеет очень важное значение в практике строительства коммунизма и в деле обороны страны.

В частности, практическая астрономия находит приложение при организации различного рода экспедиций для исследования необъятных просторов нашей родины, при исследованиях недр Земли и полезных ископаемых путем измерения силы тяжести. При решении специальных вопросов в экспедициях при составлении точных карт играют роль астрономические наблюдения при помощи особых инструментов и простые приемы астрономической ориентировки на Земле, доступные во многих случаях и невооруженному глазу. Вот почему надо знать небо с его главнейшими созвездиями и яркими звездами, чтобы по ним — по этим постоянно блистающим над нами маякам — уметь ориентироваться. А для этого надо знать и приемы этой ориентировки. Будущий учитель должен овладеть такими знаниями, чтобы вооружить подрастающую молодежь всеми необходимыми навыками ориентировки, осуществляя задачи политехнического обучения.

В данной главе и излагаются простейшие приемы ориентировки, приближенные способы определения времени, направления меридиана и широты, а также дается понятие о более точных определениях со специальными инструментами.

§ 24. Ориентировка по Солнцу, Луне и звездам. Обычно говорят, что Солнце восходит на востоке и заходит на западе. Но мы уже знаем, что место восхода и захода Солнца на горизонте изменяется в течение года в зависимости от склонения Солнца и широты места, и указанное утверждение справедливо только для дней, близких к равноденствиям,— в конце марта и в конце сентября. При приближении лета места восхода и захода перемещаются к северу, а зимой — к югу, и в конце июня Солнце в наших широтах восходит на северо-востоке и заходит на северо-западе, а к концу декабря — на юго-востоке и юго-западе. Но за 6 часов до полудня Солнце летом бывает на небе приблизительно над точкой востока, а 6 часов спустя после полудня — над точкой запада.

В каждый полдень, когда Солнце находится в верхней кульминации и тени от вертикальных предметов наиболее короткие, можно безошибочно определить направление на юг, став в это время лицом к Солнцу.

Зная, что Солнце, как и все светила, при суточном вращении продвигается за каждый час на 15° , а градус на небе — это двойной диаметр солнечного диска, можно приближенно определить направление и время в данный момент по положению Солнца.

Если учесть, что циферблат часов разделен на 12 часов и часовая стрелка делает два полных оборота в сутки, а Солнце — один оборот по небу, т. е. движется вдвое медленнее, то, пользуясь карманными часами, можно еще лучше определить направление на юг. Для этого надо расположить циферблат так, чтобы продолжение часовой стрелки было направлено под Солнце, и разделить пополам дугу между часовой стрелкой и 1 часом (направление стрелки в полдень по декретным часам для среднего меридиана пояса, для других мест надо учесть их долготу; например, для Москвы $12\frac{1}{2}$ ч.). До полудня дуга берется по ходу стрелки часов (рис. 23, слева), а после полудня — против хода часовой стрелки (рис. 23, справа).

После захода Солнца ориентиром может служить Луна. При этом надо иметь в виду, что Луна ежемесячно (через $29\frac{1}{2}$ суток) меняет свою видимую форму (фазы) и одновременно перемещается по небу, располагаясь на разных расстояниях от Солнца.

Узкий серп Луны выпуклостью вправо покажет нам направление на запад, так как в этом виде Луна на небесной сфере недалеко от зашедшего Солнца; она заходит вскоре после него. Луна в первой четверти (полудиск выпуклостью вправо) кульминирует в начале вечера и указывает направление на юг, а затем переходит в западную часть небосвода. Полная Луна остается на небе всю ночь, кульминирует около полуночи, и в это время ночью по ней можно ориентироваться, как по Солнцу днем. Затем с каждым днем кульминации Луны происходят все позднее, почти на час. Когда Луна видна уже опять полудиском, но выпуклостью влево (последняя четверть), то она восходит близко к полуночи и достигает верхней кульминации утром. Узкий серп Луны выпуклостью влево

можно увидеть только перед восходом Солнца, т. е. на восточной стороне.

Зная повторяемость всех этих лунных явлений с периодом $29\frac{1}{2}$ суток, мы можем рассчитать также наперед, когда будут лунные ночи или Луны совсем не будет на небе.

Наиболее простой и верный способ ориентировки ночью по сторонам горизонта — это найти на небе Полярную звезду, которая имеет склонение около 89° и расположена вблизи полюса мира, а следовательно, и вблизи меридиана. Находим же мы Полярную на звездном небе обычно по Большой Медведице, как это указано

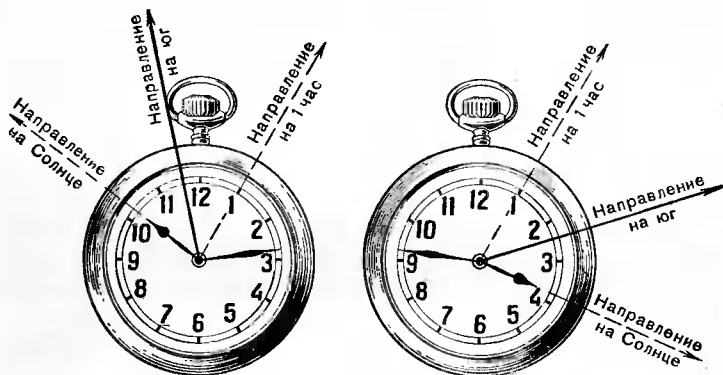


Рис. 23. Определение направления на юг по Солнцу и циферблату часов: слева — около 10^ч, справа — около 16^ч

в § 4. Если мы станем лицом к Полярной, то прямо под ней расположится точка севера на горизонте, направо — восток, налево — запад. Высота Полярной приблизительно покажет нам широту места на Земле.

Положение Большой Медведицы относительно Полярной звезды и меридиана может служить указателем времени. Надо только иметь в виду, что это положение в один и тот же час гражданского времени зависит от дня года.

Если взять направление от Полярной к звездам α и β Большой Медведицы как бы за стрелку на звездном небе, то она в течение суток будет описывать углы, пропорциональные времени. «Ковш» Большой Медведицы расположен на небесной сфере вблизи круга склонений, проходящего через точку осеннего равноденствия. Край «ковша» одновременно с Солнцем находится в нижней кульминации около 23 сентября, и небесная стрелка направлена от Полярной вниз к точке севера близ полуночи.

Заметив, что за каждый час небесная стрелка поворачивается на ширину «ковша», мы можем в начале осени на глаз определять время час за часом в течение ночи.

В начале весны (конец марта) Большая Медведица в полночь кульминирует вблизи зенита (верхняя кульминация), и небесная стрелка направлена от Полярной вверх.

Кульминации звезд по среднему времени происходят за каждые сутки на 4 минуты раньше или за полмесяца на 1 час, за месяц на 2 часа раньше. Поэтому мы можем приблизительно наметить на небе положения стрелки в различные месяцы года. Например, в конце октября небесная стрелка будет направлена к северу уже в 10 часов вечера, а 10 августа — в 2 часа ночи. В конце декабря (около дня зимнего солнцестояния) небесная стрелка в полночь направлена к точке востока, а в конце июня (около дня летнего солнцестояния) — к точке запада.

Заметим, между прочим, что в начале звездных суток звезда δ Большой Медведицы от Полярной направлена к точке севера, так как это — момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия, а прямое восхождение звезды близко к 12^h .

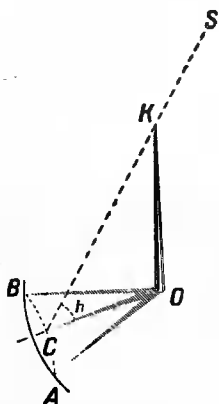


Рис. 24. Определение по гному́ну меридиана, полуденной линии и высоты Солнца

§ 25. Приближенные способы определения меридиана, географической широты и поправки часов могут найти применение в педагогической практике. Простейшим и наиболее древним способом является применение так называемого *гномона*, т. е. вертикального стержня, отбрасывающего тень на горизонтальной плоскости при освещении Солнцем. При помощи гномона прежде всего можно определить направление полуденной линии, а значит, и меридиана. Отметив примерно за час-два до полудня конец A тени гномона и описав из основания гномона как из

центра дугу радиусом OA , мы проследим, когда вновь после полудня тень своим концом коснется той же дуги, и отметим эту точку B (рис. 24).

В промежутке тень укорачивалась и изменяла свое направление. Очевидно, полуденное направление тени OC получится как биссектриса угла между двумя указанными положениями тени при равных высотах Солнца. Для большей точности производят не одну пару наблюдений, а две-три и находят среднее направление между полученными биссектрисами. Так можно найти направление меридиана на школьной площадке для наблюдений или на вышке и обозначить его проведенной чертой или натянутой нитью.

Когда направление меридиана известно, по гному́ну можно определить поправку часов в истинный полдень, т. е. тогда, когда тень расположится по меридиану. Конечно, при этом нужно учесть уравнение времени для перехода от истинного солнечного времени к среднему. Поправка часов может быть положительной, если часы отстают, и отрицательной, если часы ушли вперед.

Измерив в истинный полдень длину тени и длину гномона (рис. 24), можно найти приближенную величину высоты, а по ней — зенитного расстояния Солнца:

$$\operatorname{tg} h = \frac{OK}{OC}; z = 90^\circ - h.$$

Пользуясь же формулой сферической астрономии для кульминирующего светила $\varphi = \delta \pm z$ и взяв склонение Солнца из астрономического календаря на данный день, мы можем определить приближенно широту места наблюдения.

Наблюдая наибольшее и наименьшее значения зенитного расстояния центра Солнца в меридиане за год, можно, беря полусумму их, найти и зенитное расстояние точки пересечения экватора с меридианом, или, что то же, склонение зенита в данном месте, равное широте места наблюдения. Разность между этой величиной и наименьшим зенитным расстоянием Солнца в течение года дает приближенную величину наклона эклиптики к экватору. Измерения при помощи гномона дали возможность древним решить и ряд других задач, как, например, определение продолжительности каждого из времен года и всего года в целом и др.

§ 26. Солнечные часы. Солнечное кольцо. С идеей гномона тесно связана идея солнечных часов. На устройстве их остановимся несколько подробнее ввиду возможности и целесообразности изготовления их в школе. Они представляют собой циферблат с делениями, на который падает тень от стержня, освещаемого Солнцем. Эта тень играет роль стрелки.

Экваториальные солнечные часы имеют циферблат, расположенный в плоскости небесного экватора; теневой стержень перпендикулярен к плоскости циферблата и направлен по оси мира (рис. 25), так что угол наклона стержня к горизонту равен широте места наблюдения, а плоскость циферблата составляет с плоскостью горизонта угол $90^\circ - \varphi$.

Тень стержня на циферблате, очевидно, движется с той же угловой скоростью, что и Солнце, т. е. 15° в час. Следовательно, линии, соответствующие последовательным часам, следует проводить через каждые 15° или, что то же, разделить круг на 24 равные части. Линия, идущая от основания стержня к $12^{\text{ч}}$, должна лежать в плоскости меридиана, т. е. быть направлена по полуденному положению тени. Соответственно этому часы устанавливаются так, чтобы черта, у которой поставлено 12, была направлена к северу, а теневой стержень — по оси мира. От этой черты вправо (смотря со стороны севера) отмечаются числа часов, соответствующих

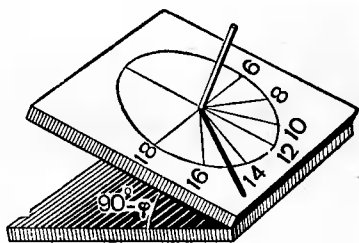


Рис. 25. Экваториальные солнечные часы

дополуденным положениям тени (11, 10, 9, ...), а влево — после-полуденным положениям тени (13, 14, 15, ...).

После осеннего равноденствия, когда Солнце находится ниже экватора (склонение Солнца отрицательное), оно не будет освещать циферблата и стержень не будет давать тени. Можно было бы теневой стержень продолжить сквозь циферблат и на нижней стороне его нанести соответствующие разметки часов для зимнего времени. Но такие часы были бы неудобны для пользования.

Этого недостатка лишены *горизонтальные* солнечные часы, у которых плоскость (рис. 26) циферблата горизонтальна, может быть выверена уровнем, теневой стержень обычно заменяется краем пластинки, плоскость которой перпендикулярна к плоскости цифер-

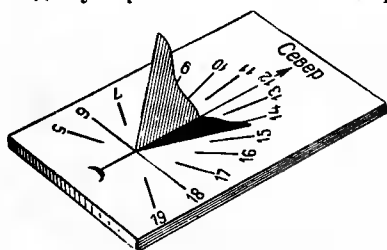


Рис. 26. Горизонтальные солнечные часы

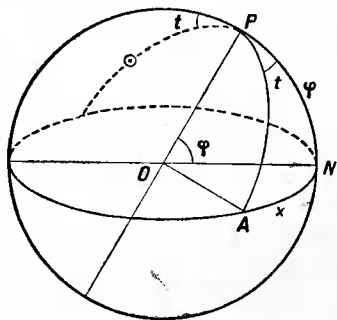


Рис. 27. К выводу формулы горизонтальных солнечных часов

блата. Край пластинки срезан соответственно широте места наблюдения. Теневая пластинка устанавливается в плоскости меридиана, линия ее пересечения с плоскостью циферблата есть линия, направленная на 12^ч. Край тени пластинки перемещается по циферблату неравномерно, и линии на циферблате, соответствующие последовательным часам, образуют между собой разные углы. Пусть φ — широта места наблюдения, t — часовой угол истинного Солнца (*т. е.* истинное солнечное время). Тогда угол x между полуценной линией и краем тени определится по формуле:

$$\operatorname{tg} x = \sin \varphi \operatorname{tg} t.$$

Формула эта получается из прямоугольного сферического треугольника PAN , если представить положение Солнца на небесной сфере и соответственное положение тени на плоскости горизонта (рис. 27). Линия OA — положение тени от края пластинки, направленного по оси мира; $\sphericalangle NA = x$; $\sphericalangle PN = \varphi$; $\sphericalangle P = t$; $\sphericalangle ANP$ — прямой. По этой формуле для избранных t (например, через 1^ч, 2^ч) вычисляем углы x и, откладывая их от линии, направленной на 12^ч, проводим на циферблате соответствующие деления. Циферблат горизонтальных часов годится только для той широты,

для которой он рассчитан. Можно устроить вертикальные солнечные часы, для них формула имеет вид:

$$\operatorname{tg} x = \cos \varphi \operatorname{tg} t.$$

Солнечные часы, очевидно, показывают *истинное солнечное* время. Чтобы получить среднее местное время, надо к их показаниям прибавлять уравнение времени.

Определение поправки часов по Солнцу в момент истинного полудня может быть сделано удобнее и точнее, чем по гномону, при помощи так называемого *солнечного кольца*, конструкция которого была предложена проф. С. П. Глазенапом. Этот прибор состоит из цилиндрического кольца диаметром около 10 см, свободно подвешенного на подставке (рис. 28). В кольце имеется маленькое круглое отверстие и на внутренней противоположной стороне — шкала с мелкими делениями. При наблюдениях прибор каждый раз направляется на Солнце так, чтобы светлый кружок от отверстия падал на шкалу. Моменты совпадения краев кружка с одними и теми же делениями до полудня и после полудня отмечаются по часам. Они соответствуют одинаковым высотам Солнца до полудня и после полудня. Очевидно, что показание наших часов в истинный полдень будет соответствовать полусумме отмеченных показаний часов до полудня и после полудня:

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}.$$

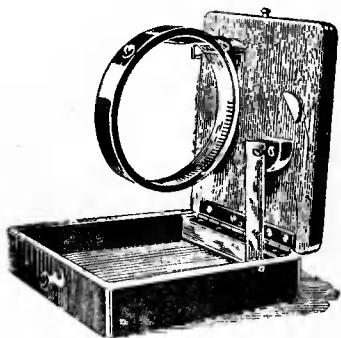


Рис. 28. Солнечное кольцо

§ 27. Универсальный инструмент. Для точного измерения положения светил строились угломерные инструменты с разделенными кругами, которые с XVII в. стали снабжаться зрительными трубами. С развитием техники построение измерительных инструментов постепенно совершенствовалось. Современные астрономические инструменты относятся к наиболее точным приборам.

Одним из основных инструментов, при помощи которого в любой точке земной поверхности можно измерить горизонтальные координаты светила на небесной сфере, является *универсальный инструмент* (или «универсал»), относящийся к переносным инструментам. Определение же горизонтальных координат из наблюдений дает возможность путем вычислений по формулам сферической астрономии находить и широту места наблюдения, и поправку часов, и долготу места, и экваториальные координаты, и другие величины, почему инструмент и получил название универсального.

Универсальный инструмент (рис. 29) состоит из небольшой астрономической трубы, могущей вращаться около двух взаимно перпендикулярных осей — горизонтальной и вертикальной. Для направления в наблюдаемую точку (для визирования) в фокусе

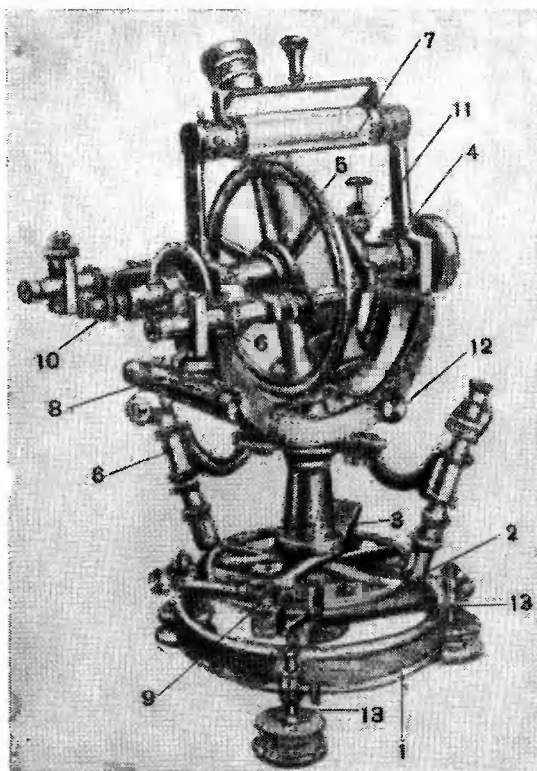


Рис. 29. Универсальный инструмент:

1 — массивное кольцо; 2 — горизонтальный разделенный круг; 3 — вертикальная ось; 4 — горизонтальная ось; 5 — вертикальный разделенный круг; 6 — микроскопы у разделенных кругов; 7 — накладной уровень; 8 — второй уровень; 9, 11, 12 — микрометрическое движение; 10 — окуляр ломаной трубы; 13 — ножки с уравнительными винтами

окуляра трубы натянут *крест нитей*. Отсчет углов производится на двух разделенных кругах — в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Устанавливается инструмент на трех винтах, служащих его точками опоры. Универсальные инструменты бывают различной конструкции.

По своему устройству к универсальному инструменту близок *теодолит*. Так называется измерительный инструмент, употребляе-

мый в топографических съемках и землемерной практике, где производится преимущественно измерение горизонтальных углов. Поэтому теодолиты строятся с более или менее точными горизонтальными кругами и менее точными вертикальными, а иногда даже с неполным разделенным вертикальным кругом.

Чтобы можно было наблюдать звезды близ зенита, труба универсального инструмента снабжается так называемой окулярной призмой, т. е. стеклянной трехгранной прямоугольной призмой полного внутреннего отражения в оправе, привинчивающейся к окулярному концу. Вследствие отклонения на 90° луча в призме мы можем смотреть в трубу сбоку. Иногда же призма укрепляется внутри трубы, так что луч света в ней после отражения идет вдоль полой горизонтальной оси, на конце которой находится окуляр, сохраняющий все время свое положение (рис. 29). Такая труба носит название *ломаной трубы*.

Разделенный круг, называющийся *лимбом*, или вращается вместе с трубой, или остается неподвижным при вращении трубы. Другой концентрический с лимбом круг или часть круга, называемый *алидадой*, на которой ставится нулевой штрих или индекс, служит для отсчета делений лимба. Подвижной круг имеет винт для закрепления и приспособление для микрометрического движения.

Лимбы в астрономических измерительных инструментах делятся на градусы, а каждый градус — на 2, 3, 6 или 12 частей, так что самое малое деление круга содержит $30'$, $20'$, $10'$ или $5'$. Для оценки долей делений лимба служит *верньер* (иногда называемый *ноннусом*) на алидаде. Чтобы получать отсчет с точностью до $\frac{1}{n}$ доли деления лимба, на алидаде отмечается от нулевой черты дуга длиной, равной $n - 1$ делениям лимба в сторону возрастающих его делений, и делится на n частей. Таким образом, каждое деление дуги верньера короче на $\frac{1}{n}$ долю деления лимба.

Пусть нулевой штрих алидады пришелся в промежутке между некоторыми двумя соседними штрихами лимба, из которых один назовем младшим, другой — старшим. Последующие штрихи лимба и верньера будут все приближаться друг к другу вследствие того, что деления верньера короче делений лимба, и на некоторой m -ой черте верньера совпадут. Значит, m делений верньера короче m делений лимба как раз на избыток сверх младшего штриха лимба. Этот избыток и равен $\frac{m}{n}$ долей деления лимба.

Пример. Деления на лимбе нанесены через одну треть градуса, т. е. через $20'$. Чтобы измерять с точностью до $1'$, на алидаде отмечается дуга длиной в 19 делений лимба (рис. 30) и делится на 20 равных частей. Пусть нуль алидады расположился так, что младшее деление лимба $10^\circ 40'$, а на верньере 7-я черта от нуля совпала с одним из последующих черт лимба. Отсчет получается $10^\circ 40' + 7' = 10^\circ 47'$.

Деления лимба и верньера обычно так мелки, что отсчитывать их простым глазом невозможно. Поэтому верньеры снабжаются лупами или даже микроскопами.

Наиболее точным приспособлением для отсчета кругов является микроскоп с микрометром, который в настоящее время чаще всего и употребляется.



Рис. 30. Круговой верньер

К коробочке прикреплен указатель, по которому производится отсчет делений барабана, а внутри коробочки находится в плоскости движения нитей гребенка, расстояние между зубцами которой равно одному шагу винта. Между двумя зубцами гребенки делается маленькая дырочка. При начальном положении, когда отсчет барабана показывает 0, нить должна проходить по этой дырочке. Для большей точности натягивают две параллельные нити близко одну к другой так, чтобы штрих разделенного круга помещался в просвете между ними.

Микроскоп с микрометром помещается над разделенным кругом вместо верньера так, чтобы изображение части круга находилось точно в той плоскости, где находятся нити, чтобы нити были параллельны штрихам круга и чтобы расстояние между соседними штрихами равнялось целому числу оборотов винта.

На барабане микрометра часто прямо указывается число минут и секунд дуги, как в верньере. Так это сделано в 5-секундном универсальном инструменте советского производства. На разделенном круге соседние штрихи отстоят друг от друга на $10''$, в микроскопе этот промежуток измеряется двумя оборотами винта, так что один оборот соответствует $5'$. В соответствии с этим оцифрованы деления на барабане. Над длинными штрихами стоят целые дуговые минуты, а между ними короткие штрихи через 5 дуговых секунд, т. е. самое малое деление барабана соответствует $5''$. Оценивая на глаз доли и этих самых малых делений, можно вести отсчеты и с большей точностью.

Он представляет собой микроскоп, в котором на месте увеличенного изображения части разделенного круга помещается коробочка K (рис. 31). Внутри нее рамка с натянутыми тонкими нитями движется прямолинейно при помощи микрометрического винта M (рис. 32), упирающегося в пружину у конца N' . При ввинчивании винта рамка движется в одну сторону, при вывинчивании пружина толкает ее в обратную сторону. Другой конец винта M выходит из коробки и снабжен барабаном, окружность которого обычно бывает разделена на 60 частей.

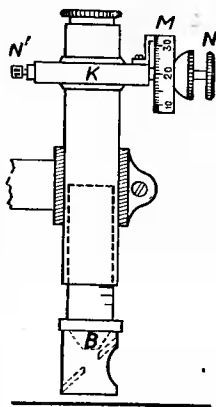


Рис. 31. Схема микроскопа с микрометром

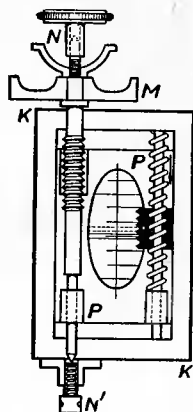


Рис. 32. Разрез коробки микроскопа

Центр разделенного круга может не совпадать с центром оси вращения. Это дает ошибку в отсчете лимба, которая носит название *ошибки эксцентриситета*. Эта ошибка исключается, если производить отсчеты в двух диаметрально противоположных точках круга. Поэтому измерительные инструменты обычно имеют два верньера, диаметрально противоположных, один из которых принимается за главный, с него берется число градусов. Число же минут берется среднее между показаниями того и другого. Например, отчеты нониусов:

$$\begin{array}{r} 124^{\circ}10'20'' \\ 10'40'' \\ \hline \text{Среднее } 124^{\circ}10'30''. \end{array}$$

В универсальном инструменте имеет основное значение установка одной из его осей в строго горизонтальном направлении, другой — в вертикальном. Для этого служат уровни и уравнивательные винты. Самая установка производится следующими операциями:

1) поворачивают верхнюю часть инструмента так, чтобы ось уровня была направлена на один из установочных винтов; действуя этим винтом, приводят пузырек уровня на середину;

2) поворачивают верхнюю часть инструмента около вертикальной оси на 90° , располагая ось уровня параллельно линии, соединяющей два других установочных винта, и, действуя этими винтами в разные стороны, т. е. поворачивая оба наружу или оба внутрь, приводят пузырек уровня на середину.

Повторяют указанные операции несколько раз и добиваются того, что пузырек уровня всегда остается посередине, как бы ни повернуть верхнюю часть инструмента около вертикальной оси.

При точных наблюдениях приходится целым рядом кропотливых приемов исследовать инструмент, чтобы определить его постоянные ошибки, да и при производстве каждого измерения — также применять ряд приемов для учета всех возможных ошибок.

§ 28. Измерение горизонтальных координат универсальным инструментом. Универсальным инструментом обычно определяют зенитное расстояние, по которому находится и высота из соотношения $h = 90^{\circ} - z$. После установки инструмента можно определить отсчет круга, соответствующий направлению трубы на зенит. Для этого направляют трубу на какой-нибудь отдаленный предмет на некоторой высоте над горизонтом и записывают отсчет Π вертикального круга (пусть круг расположен направо от трубы). Затем поворачивают трубу около вертикальной оси на 180° и, переводя трубу около горизонтальной оси через зенит, направляют ее опять на тот же предмет (теперь круг расположен налево от трубы) и записывают второй отсчет $\mathcal{L}$ вертикального круга. Нетрудно видеть (рис. 33), что если деления лимба вертикального круга возрастают

от 0 до 360° (обычно в направлении по ходу часовой стрелки), то отсчет z , соответствующий зениту, получится по формуле:

$$z_0 = \frac{\Pi + J}{2}.$$

Чтобы определить зенитное расстояние данного светила, нужно навести трубу на светило и взять разность между отсчетом вертикального круга и полученным выше отсчетом зенита.

Можно определять зенитное расстояние светила и не находя предварительно отсчета зенита, но тогда каждый раз надо делать два отсчета двумя наведениями трубы на светило при круге на-

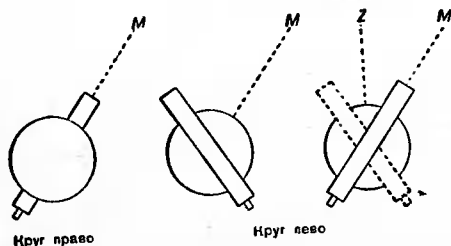


Рис. 33. Определение точки зенита

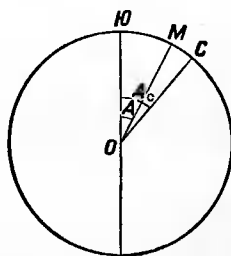


Рис. 34. Определение азимута по земному предмету

право и круге налево. В таком случае зенитное расстояние светила получится по формуле:

$$z_0 = 180^\circ - \frac{\Pi + J}{2}.$$

Для измерения азимута по горизонтальному кругу надо знать отсчет этого круга, соответствующий направлению на точку юга. Для этого определяют азимут земного предмета, измеряя горизонтальный угол между ним и каким-нибудь светилом в определенный момент времени и вычитая измеренный угол из азимута светила (как это видно на рис. 34):

ОС—направление вертикала светила C ,

ОМ—направление на предмет M ,

ЮОС—азимут светила A_c ,

ЮОМ—азимут земного предмета A .

$$A = A_c - \text{МОС}.$$

Азимут светила для данного момента и в данном месте может быть вычислен по известным координатам светила, пользуясь формулами:

$$\sin z \sin A_c = \cos \delta \sin t,$$

$$\sin z \cos A_c = \cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t,$$

Разделив первое равенство на второе, получаем:

$$\operatorname{tg} A_c = \frac{\cos \delta \sin t}{\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t}.$$

Зная азимут земного предмета для данного места, мы можем каждый раз устанавливать по нему инструмент в этом месте и определять отсчет, соответствующий точке юга на горизонтальном круге.

§ 29. Определение широты места на Земле. Простейший способ весьма приближенного определения широты основан на том, что высота полюса мира равна географической широте и заключается в измерении высоты Полярной звезды. Здесь ошибка может достигать градуса, так как Полярная отстоит от полюса мира на 1° . Точнее можно определить широту места по Полярной в моменты ее верхней и нижней кульминации по формуле высоты светила в меридиане (см. § 8). Эти моменты кульминаций даются в астрономическом календаре. Наблюдаемую высоту надо исправить за рефракцию.

Для более точного определения широты места могут служить известные формулы сферической астрономии (см. § 19).

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t. \quad (1)$$

$$t = T + u - \alpha,$$

где T — показание звездных часов, а u — их поправка.

Взяв экваториальные координаты светил α и δ из справочника, находя из наблюдений при помощи универсального инструмента зенитное расстояние и отмечая показание часов в момент наблюдения, мы будем иметь известным в написанной выше формуле все, кроме широты φ . С большей точностью широта определяется по наблюдению светила вблизи меридиана, так как при этих условиях высота, а стало быть, и зенитное расстояние светила изменяются сравнительно медленнее, — тем самым ошибка в отмеченном моменте времени меньше повлияет на результат.

Вследствие своей близости к северному полюсу мира Полярная звезда всегда близка к меридиану, а потому во всякое время удобна для точного определения широты места. Надо заметить, что при наблюдении Полярной вне кульминации ее азимут по отношению к точке севера может достигать $2-3^\circ$.

Для вычисления формула (1) может быть приведена к логарифмическому виду при помощи вспомогательного угла заменой:

$$n \sin N = \sin \delta, \quad n \cos N = \cos \delta \cos t.$$

Вычисление проводится последовательно по формулам:

$$t = T + u - \alpha; \quad \operatorname{tg} N = \operatorname{tg} \delta \sec t; \quad \cos (N - \varphi) = \frac{\cos z \sin N}{\sin \delta}.$$

Если брать какую угодно звезду и наблюдать ее точно в меридиане, то широту можно вычислить просто по формуле:

$$\varphi = \delta \pm z.$$

Если производится наблюдение над Солнцем, то приходится измерять зенитное расстояние верхнего или нижнего края Солнца и из него вычитать или прибавлять к нему угловую величину радиуса Солнца, чтобы получить зенитное расстояние центра Солнца. Так как склонение Солнца меняется, то необходимо находить значения склонения для каждого момента наблюдения.

§ 30. Часы. Поправка и ход часов. Как в уже описанных нами способах астрономических наблюдений и измерений, так и во всяких других каждый раз отмечается более или менее точно время этих наблюдений.

Инструментами, показывающими время с большей или меньшей степенью точности, являются часы и хронометры. Часы на астрономических обсерваториях по устройству похожи на обычные стенные часы с гирей и маятником, но они специально изготовляются особо высокого качества. Хронометры — переносные часы, они приводятся в движение пружиной, как и карманные часы.

В механизме точных часов количество трущихся частей сводится к минимуму для обеспечения наибольшей равномерности хода. Астрономические часы и хронометры обычно отчетливо отбивают секунды или полусекунды.

Как бы тщательно ни были сделаны часы, они не могут быть совершенно точными. Главная причина неравномерности хода часов — перемены температуры, которые влияют на длину маятника, а значит, и на период его колебаний. Надо заметить, что в астрономических часах приходится учитывать самые минимальные изменения в их ходе. Поэтому даже изменение атмосферного давления влияет на скорость качаний маятника и производит некоторые изменения в ходе часов. Употребляются различные приемы температурной компенсации. Например, делают маятник из особого сплава стали и никеля, так называемого инвара с очень малым коэффициентом расширения. Существует ртутный маятник, у которого грузом служит сосуд со ртутью, имеющей сравнительно большой коэффициент расширения: в то время, как от нагревания стержень удлиняется, центр тяжести ртути в сосуде повышается, так что расстояние от точки подвеса до центра качания маятника остается неизменным. Чтобы изолировать часы от внешних влияний, их помещают под стеклянным колпаком, герметически закрытым. При этом завод производится при помощи электрического тока: часы идут под действием тяжести небольшой гирьки, которая каждые полминуты замыкает ток, рычажок электромагнита поднимает вновь гирьку вверх, и она опять производит свою работу.

В более совершенных, дающих наиболее плавный ход, часах имеются два отдельных механизма, идущих синхронно. Один из

них состоит только из маятника и не имеет спуска, зубчатых колес и стрелок. Колебания маятника поддерживаются посредством электромагнита, в который периодически посылается электрический ток. Эти часы помещаются в специальном подвале. Другой механизм представляет обычные хорошие часы, ход которых регулируется при помощи электрического тока по ходу маятника первого механизма. Вторичные часы помещаются сверху, в месте работы.

Развитие радиотехники и достижение исключительного постоянства частоты ламповых генераторов при помощи кварцевого кристалла привели к использованию этого для устройства так называемых *кварцевых часов*, вошедших теперь в практику получения точного времени. Регулирование хода в них производится пьезоэлектрическими колебаниями. По точности хода кварцевые часы значительно превосходят всякие маятниковые; их точность достигает 0,001 и даже 0,0001 секунды в сутки.

Переносные пружинные хронометры употребляются главным образом в экспедициях и в мореплавании. Они обыкновенно помещаются в ящике на кардановом подвесе (с двумя взаимно перпендикулярными горизонтальными осями подвеса), так что при качаниях ящика положение хронометра остается неизменным. Переносные хронометры и по их устройству и по большему влиянию на них внешних условий не могут иметь той точности хода, до которой могут быть доведены часы на обсерваториях.

Для отметки времени по часам при наблюдениях секундные удары делаются очень четкими и громкими. Для точной отметки времени служит хронограф, печатающий на ленте, подобно телеграфу.

Основным достоинством часов является равномерность их хода, т. е. если даже они несколько отстают или уходят вперед, то важно, чтобы на одну и ту же величину в сутки.

Разность между точным временем S и показанием часов T называется *поправкой часов*:

$$u = S - T.$$

Поправка будет положительна, если часы отстают, и отрицательна, если часы ушли вперед. Если бы часы шли совершенно равномерно, то и поправка каждые сутки росла бы равномерно и ее легко можно было бы рассчитать. Но идеально равномерно идущих механизмов нет; поэтому поправка неравномерно меняется. Изменение поправки за одни сутки называется *суточным ходом часов*. Обозначая суточный ход часов через ω , можно представить его в следующем виде:

$$\omega = u_2 - u_1,$$

где u_1 — поправка для некоторого начального момента, а u_2 — поправка через сутки после него.

Принимая суточный ход часов для некоторого ограниченного промежутка постоянным, мы можем вычислить поправку и для какого-нибудь момента T_1 в пределах этого промежутка:

$$u = u_1 + \omega \frac{T - T_1}{24}.$$

Здесь T_1 и T должны быть выражены в часах и долях часа.

Зависимость между звездным временем T и прямым восхождением α звезды, кульминирующей в данный момент, дает возможность определить поправку часов по следующим формулам:

$$\alpha = T + u \text{ и } u = \alpha - T.$$

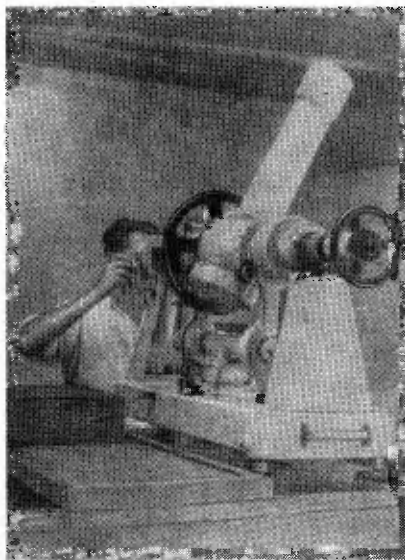


Рис. 35. Пассажный инструмент

При нахождении поправки часов из наблюдений звезд прямые восхождения их берутся из каталога звезд, для которых экваториальные координаты определены точно. Момент же прохождения звезды через меридиан определяется на астрономических обсерваториях наблюдением с пассажным инструментом.

§ 31. Пассажный инструмент состоит из трубы, большей частью ломаной, которая может вращаться только около горизонтальной оси в вертикальной плоскости (рис. 35). В фокальной плоскости трубы помещается сетка нитей, состоящая из нескольких горизонтальных и вер-

тикальных нитей, так что одна из вертикальных нитей проходит через центр поля зрения. Если труба установлена так, что она при вращении все время находится в плоскости меридиана, то момент прохождения звезды через среднюю вертикальную нить и есть момент ее кульминации. Вся установка выверяется специальными приемами возможно точно. Для большей точности при каждом определении времени отмечаются моменты прохождения звезд не только через среднюю вертикальную нить, но и через ряд нитей до нее и после нее. Затем по известным расстояниям боковых нитей от средней приводят все моменты вычисления на среднюю нить и берут среднее арифметическое полученных чисел.

Регистрируются моменты при помощи способов, указанных в предыдущем параграфе. Но еще большую точность дает применение *регистрирующего, или контактного, микрометра*. Он имеет

подвижную вертикальную нить, приводимую в движение винтом. С винтом связан барабан, на котором на определенных расстояниях друг от друга помещены металлические полоски, разделенные изолирующим ток материалом. К барабану прижимается легкая металлическая пружинка, дающая контакт для тока. Когда звезда вошла в поле зрения и попала на нить, наблюдатель вращает винт так, чтобы нить все время оставалась на середине изображения звезды при ее суточном движении. При этом автоматически происходят замыкания и размыкания тока и соответственные отметки на ленте хронографа, как если бы в этих положениях подвижной нити были неподвижные нити.

Наибольшая точность в определении моментов прохождения звезд получается при фотоэлектрической регистрации звездных прохождений. Впервые этот метод введен на Пулковской обсерватории Н. Н. Павловым. Основан метод на использовании электрического тока, возникающего от действий света звезды на фотоэлемент высокой чувствительности. Перед фотоэлементом располагается решетка в виде металлической пластинки со щелями, играющими роль нитей. Появления и исчезновения электрического тока регистрируются так же, как замыкания и размыкания тока при наблюдениях с контактным микрометром. При этом совершенно исключаются личные ошибки наблюдателя.

Так определяется звездное время и поправка часов, идущих по звездному времени. Известными приемами, изложенными в главе II, мы можем перечислить звездное время в среднее солнечное, а затем — в поясное и декретное. Следовательно, определив поправку звездных часов, мы с той же точностью по ней можем определить поправку гражданских часов.

§ 32. Определение долготы места наблюдения основано на том, что разность долгот двух мест на Земле равна разности времен (звездных или солнечных) этих мест в один и тот же физический момент.

Пользуясь уже принятыми обозначениями для показаний и поправки часов, мы можем написать для разности долгот $\Delta\lambda$ двух мест:

$$\Delta\lambda = (T_2 + u_2) - (T_1 + u_1) = (T_2 - T_1) + (u_2 - u_1).$$

Долгота второго места λ_2 определяется по формуле:

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda.$$

При положительном $\Delta\lambda$ второе место лежит к востоку от первого, а при отрицательном $\Delta\lambda$ — к западу.

Таким образом, дело сводится к определению точного времени в данном месте и сравнению его с точным временем другого места, долгота которого хорошо известна.

Прежде, особенно в практике мореплавания, производились приближенные определения долготы наблюдением тех явлений,

которые происходили для наблюдателей из разных мест в один и тот же физический момент. Долгота почти всех островов на Тихом океане была определена по затмениям спутников Юпитера. Положение Луны среди звезд также служило для определения долгот. Взяв из ежегодника время, когда эти явления должны наблюдаться в Гринвиче, и сравнив его с показанием часов по местному времени в момент наступления указанных явлений, можно определить долготу данного места.

Когда хронометры были достаточно усовершенствованы для того, чтобы они на сравнительно продолжительное время могли сохранять более или менее равномерный ход, то для определения долготы места стал употребляться *способ перевозки хронометров* (XIX в.). Зная поправку хронометра в исходном месте с хорошо известной долготой, суточный ход его и найдя из наблюдений поправку того же хронометра в новом месте, в которое перевезли хронометр и для которого хотят определить долготу, можно вычислить разность долгот.

Гораздо более точно определять долготу места представилась возможность с изобретением телеграфа. Но для этого нужно, чтобы данное место было связано телеграфными проводами с другим местом, долгота которого хорошо известна. Тогда по проводу можно послать сигнал в определенный момент по часам одного места и принять его в другом месте по часам этого места. В обоих местах должны быть часы или хронометры с поправкой, точно найденной из наблюдений.

В настоящее время используется способ определения долготы, имеющий все преимущества перед прежними способами, — это прием сигналов времени по радио. При наличии радиоприемников оказалось доступным получение точного времени в любом месте земного шара. Принимая сигналы точного времени, передаваемые определенной станцией и отнесенные к известной долготе, сравнивая их с показанием хронометра, выверенного по наблюдениям небесных светил в данном месте, определяют долготу этого места.

§ 33. Служба времени. Знание точного времени требуется для самых разнообразных нужд современной жизни — научной, производственной деятельности, освоения природных богатств — и во всех областях строительства коммунизма и обороны страны.

Для того чтобы удовлетворить все эти многочисленные и разнообразные потребности в точном времени, при крупных астрономических обсерваториях организованы особые отделы, которые носят название «служб времени». Функции «службы времени» сводятся к следующим трем важнейшим: 1) определение точного времени из наблюдений, 2) хранение времени и 3) прием и передача времени.

Определение точного времени и поправки часов производятся на астрономических обсерваториях при помощи наблюдений моментов кульминаций звезд пассажным инструментом, как это

было описано выше. Но нужно обеспечить знание точного времени и в промежутках между наблюдениями, которые иногда могут быть довольно длительными из-за пасмурной погоды. Для этого обсерватория должна иметь особенно точные механизмы часов, установленные с возможно полной гарантией отсутствия на них тех или других посторонних влияний. Их помещают не только под герметически закрытым стеклянным колпаком, но и в специальном достаточно глубоком подвале, в котором круглый год поддерживается почти постоянная температура. Часы предохраняются от всякого рода сотрясений. Завод их производится электрическим током. На них никто не смотрит, они могут даже не иметь циферблата — при помощи электрического тока они отмечают секунды на ленте хронографа или они контактно связаны с другими часами. Таких основных часов для хранения времени на обсерватории стараются иметь несколько для их взаимного контроля. Для постоянного пользования на обсерватории имеются вторые, вспомогательные, часы, точность показаний которых обеспечивается ежедневной сверкой их с основными.

Получая и сохраняя точное время, «служба времени» имеет задачу сделать его предметом широкого достояния и распространить повсюду, где есть в этом потребность. Это распространение в настоящее время производится передачей времени по радио. Сигналы точного времени передаются двух типов:

1) сигналы проверки времени,

2) ритмические сигналы. Для проверки времени четыре раза в сутки из Государственного астрономического института имени Штернберга (ГАИШ) в Москве в 2 часа (для Дальнего Востока), в 7 часов, 12 часов, 19 часов «московского времени» по широкоэвещательной сети подаются два длинных звуковых сигнала и один короткий, причем начало короткого соответствует передаваемому моменту с точностью 0,05 секунды.

Ритмические сигналы даются при помощи так называемых *часов-ноннуса*. Это особые часы, у которых минута среднего времени делится не на 60, а на 61 часть и время полного колебания маятника составляет $\frac{60}{61}$ средней секунды. Замыкание тока при каждом колебании передается по проводу из помещения «службы времени» на передаточную радиостанцию, откуда распространяется в эфир как на длинных, так и на коротких волнах по специальному расписанию и воспринимается соответственно настраиваемыми радиоприемниками в виде звуковых «точек».

По международной программе ритмические сигналы подаются в течение 5 минут соответственно в пяти сериях, по 61 сигналу в каждой. При этом начальный сигнал каждой серии делается более продолжительным — «тире», а остальные 60 — короткими — «точками». Интервалы между сигналами, как сказано выше, короче секунды. Поэтому, слушая их и удары проверяемого хронометра, можно замечать их расхождение и схождение. Если, например, первый сигнал передан в 14^ч 01^м 0^с, совпадение произошло на

21-м сигнале, а показание хронометра в это время было $14^{\text{ч}} 01^{\text{м}} 25^{\text{с}}$, то точное время в момент совпадения было

$$14^{\text{ч}} 01^{\text{м}} \pm 20 \cdot \frac{60^{\text{с}}}{61} = 14^{\text{ч}} 01^{\text{м}} 19^{\text{с}}, 69.$$

Значит, поправка хронометра $u = 5^{\text{с}}, 31$.

В момент совпадений записываются номер серии, номер сигнала и показание хронометра. Каждая передающая станция посылает сигналы всегда в определенное, известное время. Поэтому можно рассчитать поправку хронометра для каждой серии и свести при помощи специальных таблиц показания хронометра к среднему моменту между первым и последним сигналом.

§ 34. Определение склонений и прямых восхождений звезд. Меридианный круг. Знание возможно более точных значений склонения δ и прямого восхождения α требуется для определения широты места наблюдения и поправки часов. Учет изменений склонений и прямых восхождений за сравнительно большие промежутки времени дает возможность делать выводы о движениях как самих звезд в пространстве, так и Солнца и нашей Земли. Все это делает задачу определения точных положений звезд при помощи экваториальных координат одной из важнейших в той отрасли астрономии, которая носит название *астрометрии*.

Различаются два способа получения значений экваториальных координат: 1) *относительные*, или *дифференциальные*, определения и 2) *абсолютные* определения. Способ относительных определений гораздо проще, но он потому так и называется, что требует уже наперед знания координат хотя бы для некоторого количества звезд, входящих в так называемые основные, или фундаментальные, каталоги.

Для наблюдения звезд в меридиане и измерения их положений служит специальный инструмент — *меридианный круг* (рис. 36). Этот инструмент, так же как и пассажный, устанавливается в меридиане, но отличается тем, что на горизонтальную ось его насаживается большой точно разделенный круг с микроскопами для отсчетов с точностью до $0'', 1$. По другую сторону от трубы симметрично с первым кругом обычно помещается второй круг — *искатель*, позволяющий производить отсчеты до $1'$. Самая труба обычно солиднее (диаметр объектива от 10 до 20 см, а фокусное расстояние 1,5—2,5 м). Круги предназначены для возможно более точного измерения зенитных расстояний звезд. Для определения точки зенита на круге для измерения зенитных расстояний служит *искусственный горизонт*. Последний образуется поверхностью ртути, налитой в широкую чашку, которая помещается на солидном фундаменте под полом так, чтобы труба, поставленная вертикально вниз объективом, приходилась над серединой горизонтальной поверхности ртути. Тогда в поле зрения трубы видно, кроме сетки нитей, еще и ее отражение. Если добиться поворотом трубы полного

совмещения нитей действительных и отраженных, то отсчет на круге будет соответствовать точке надира, диаметрально противоположной точке зенита.

Точно измеренное меридианным кругом зенитное расстояние звезды, освобожденное от влияния рефракции, дает возможность вычислить склонение звезды по формуле для верхней кульминации:

$$\delta = \varphi \mp z,$$

причем плюс следует брать для звезды, кульминирующей к северу от зенита, а минус — для звезды, кульминирующей к югу от зенита.

Основой для относительных определений прямого восхождения служит известная связь его со звездным временем. Надо вспомнить, что часы проверяются по известным прямым восхождениям звезд на основании равенства $s = \alpha_k$ и задача сводится к определению в сущности только разности прямых восхождений различных звезд.

Зная суточный ход часов, можно определить разность прямых восхождений различных звезд: они, очевидно, равны промежуткам звездного времени между моментами кульминаций этих

звезд, если эти промежутки определены по часам и исправлены за известный суточный ход. Если мы будем знать точное прямое восхождение хотя бы одной из этих звезд, мы сможем определить его и для остальных звезд. Таким образом, имея каталог фундаментальных звезд, можно определить положение очень большого количества звезд и получить их каталог, основанный на данном.

Для самих же фундаментальных звезд прямое восхождение, очевидно, должно быть определено способом абсолютных определений. Для этого надо найти на небесной сфере положение точки весеннего равноденствия. Это можно сделать из наблюдений Солнца в разные сезоны, причем совместно с положением γ определяется и ε — наклонение эклиптики к экватору. Около времени весеннего

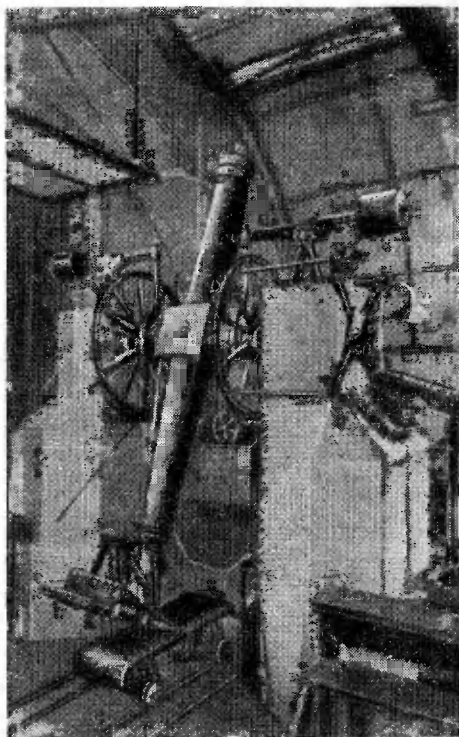


Рис. 36. Меридианный круг

равноденствия наблюдают Солнце меридианным кругом и измеряют его склонение по наблюдениям верхнего и нижнего его краев, а также разность прямых восхождений Солнца и некоторой близкой к нему звезды, достаточно яркой, чтобы быть видимой днем в трубу. Производя наблюдения, мы прежде всего можем найти прямое восхождение Солнца.

В самом деле, рассмотрим сферический треугольник, образованный небесным экватором, эклиптикой и меридианом в момент наблюдения Солнца вблизи точки весеннего равноденствия (рис. 37). В этом треугольнике $\cup AB = \alpha_0$ — прямое восхождение Солнца, $\cup BC = \delta_0$ — склонение Солнца, $\angle BAC = \epsilon$ — наклонение эклиптики к экватору. Угол при точке B — прямой. Для прямоугольного сферического треугольника мы имеем соотношение:

$$\operatorname{tg} \delta_0 = \sin \alpha_0 \operatorname{tg} \epsilon, \text{ откуда получаем } \sin \alpha_0 = \frac{\operatorname{tg} \delta_0}{\operatorname{tg} \epsilon}.$$

Тем самым определяется положение точки весеннего равноденствия. Находя из наблюдений разность прямых восхождений звезды и Солнца, мы определим значение прямого восхождения звезды.

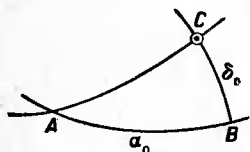


Рис. 37. К определению прямого восхождения Солнца

Наибольшая точность в относительном определении координат звезд достигается измерением их взаимных расстояний на фотографической пластинке, полученной путем фотографирования соответствующего участка неба. Измерение это производится при помощи специальных очень точных приборов. Например, помещают пластинку на раму, которая может перемещаться

микрометрическим винтом, а над пластинкой располагается микроскоп с крестом нитей, который может таким же винтом перемещаться в перпендикулярном направлении. Отсчеты на барабанах микрометрических винтов и дают возможность определить с большой точностью прямолинейные координаты различных звезд на пластинке. Специально выработанными методами затем эти координаты, измеренные на пластинке, перевычисляют на сферические координаты.

§ 35. Экваториал. Астрономические измерительные работы производятся также с большим телескопом, который может быть направлен на любую точку неба при помощи так называемой *параллактической, или экваториальной, установки*, почему и носит название *экваториала*. Экваториал имеет две взаимно перпендикулярные оси: одна из них устанавливается параллельно оси вращения Земли, а стало быть, по оси мира, другая располагается в плоскости экватора. Первая ось называется *полярной, или часовой осью*. На разделенном круге, насаженном на эту ось (в плоскости, перпендикулярной к ней), отсчитываются часовые углы и разности прямых восхождений. Вторая ось называется *осью склоне-*

ний, так как при вращении около нее труба двигается в плоскости того или иного круга склонения, и на разделенном круге, насаженном на эту ось, можно отсчитать склонения светил. Если навести трубу экваториала на определенное светило, то, закрепив ее на оси склонения, можно следить за светилом в его суточном движении, и для этого достаточно вращать трубу только около одной полярной оси. Это вращение обычно совершается у больших телескопов автоматически, при помощи специального часового механизма, соединенного с полярной осью. Вследствие этого экваториал очень

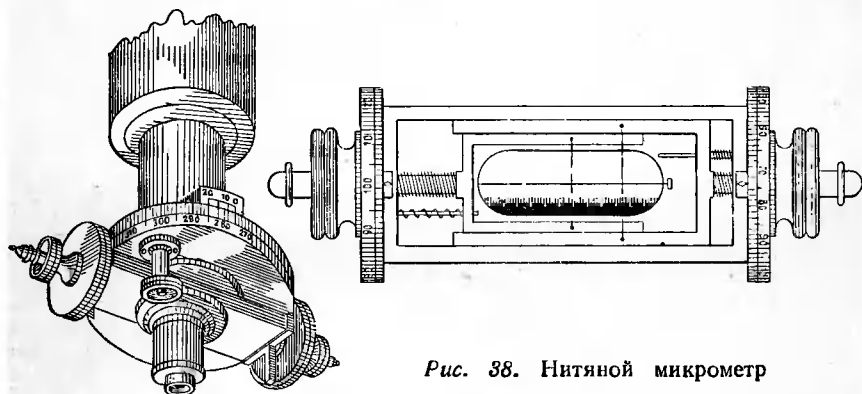


Рис. 38. Нитяной микрометр

удобен при продолжительных наблюдениях одного и того же светила и при фотографировании, когда целыми часами светило должно оставаться на одном и том же месте в поле зрения трубы.

Все современные большие телескопы имеют экваториальную установку. Правда, надеяться полностью на точность часового механизма нельзя. Поэтому инструменты, специально предназначенные для фотографирования, так называемые *астрографы*, обыкновенно состоят из двух труб, скрепленных между собой так, что их оптические оси параллельны, через одну фотографируют, поместив пластинку в фокальной плоскости, а в другую следят глазом и держат изображение светила на одном и том же месте — на кресте нитей при помощи микрометрического движения.

При каждом экваториале обычно имеется небольшая труба, параллельная основной, с более слабым увеличением, но с большим полем зрения для удобного нахождения светил, почему она и называется *искателем*.

Определение прямых восхождений и склонений при помощи экваториала основано на измерении разностей каждой из этих координат для данной звезды и других известных близлежащих звезд (дифференциальные определения α и δ большой точности). Для этого служит *нитяной микрометр*, устанавливаемый на окулярном конце в фокальной плоскости (рис. 38). Здесь, помимо

неподвижных нитей, устанавливаются одна или несколько подвижных нитей, приводимых в движение микрометрическим винтом при помощи рамки, на которую они натянуты.

Употребляется также *кольцевой микрометр*, который состоит из нескольких концентрических колец, металлических или начерченных алмазом на стекле и помещенных в фокусе объектива трубы. При наблюдении отмечается прохождение звезд через окружность того или другого кольца.

§ 36. Точные положения звезд. Звездные каталоги. Уже при самом изготовлении измерительных астрономических инструментов принимаются все меры к тому, чтобы сделать их возможно более совершенными: деления на кругах должны быть нанесены со всей точностью, центры их должны совпадать с геометрическими осями вращения, оси должны быть строго перпендикулярными, а цапфы их — в точности цилиндрическими и т. д. На практике полностью соблюсти все эти условия невозможно. Задача астронома — определить путем особых приемов наблюдений величины ошибок и учесть их влияние, вводя в результаты наблюдений соответствующие поправки. Разработана целая теория инструментальных ошибок, рассматриваемая в курсах практической астрономии.

Если учтены все ошибки инструмента, то наблюдения еще не свободны от тех или других погрешностей. Тут могут влиять и условия наблюдения, и личные особенности наблюдателей, даже самочувствие одного и того же наблюдателя в разное время. При этом имеют место так называемые *систематические ошибки*. Характерным свойством их является повторяемость при одинаковых условиях, они могут быть выявлены повторными наблюдениями при других условиях или другими методами.

Когда идет речь о точных положениях звезд, то надо иметь в виду, помимо ошибок измерений, еще ряд поправок, обусловленных внешними явлениями. Одни искажают направление луча зрения, другие изменяют положение таких основных точек, как точка весеннего равноденствия, третьи изменяют видимое положение светил на небесной сфере вследствие движения самого наблюдателя вместе с Землей в пространстве и т. д. В результате координаты светил меняются в зависимости от времени, места наблюдения и места светил на небесной сфере. Они становятся несравнимыми, и для возможности сравнения их надо освободить от всех влияний. Учет всех этих поправок называется *редукцией*.

К таким явлениям относятся уже рассмотренная нами *рефракция*, упоминавшаяся нами *прецессия*, или *предварение равноденствий*, и связанная с ней так называемая *нута́ция*, затем *параллакс* и *абerrация* света как следствия движения Земли вокруг Солнца. Все это точно учитывается при помощи специальных таблиц.

Экваториальные координаты звезд, полученные непосредственно из наблюдений после учета влияния рефракции, дают так называемые *видимые места звезд*. После же внесения поправок за абerr-

рацию (годовую и суточную) получают *истинные места звезд*. Введя в истинные координаты поправки за нутацию, находят для того же момента средние координаты, определяющие *средние места звезд*. Средние координаты и печатаются в *звездных каталогах*, где они даются для начала того или другого года, причем год, для которого они даны, называется *эпохой каталога*.

Учитывая значение прецессии и другие поправки, можно получить видимое положение звезды для данного момента.

Большое значение в составлении современных каталогов звезд имели наблюдения Пулковской обсерватории, основанной в 1839 г. Организатор и первый директор ее В. Я. Струве установил для целей астрометрии два инструмента: пассажный инструмент для прямых восхождений и большой вертикальный круг для склонений. На них и на других инструментах непрерывно велась ответственная работа вплоть до Великой Отечественной войны, когда Пулково было варварски разгромлено артиллерийским огнем и бомбардировщиками полчищ немецких захватчиков, блокировавших Ленинград.

Этими наблюдениями Пулковская обсерватория заняла мировое ведущее положение. Пулковские определения координат наряду с гринвичскими составили главную базу современной абсолютной астрометрии. Это значение работ Пулковской обсерватории, проводившихся на протяжении столетия, было признано мировыми авторитетами, называвшими Пулково «астрономической столицей мира». Нужно знать, что пулковские каталоги получили вес от 3 до 20 раз больший, чем все остальные каталоги XIX в.

Пулковские каталоги относятся к числу так называемых *абсолютных каталогов*, содержащих координаты звезд, определенные из меридианных наблюдений. На основе объединения данных нескольких абсолютных каталогов, составленных на различных астрономических обсерваториях, составляют так называемые общие каталоги. Как абсолютные, так и общие каталоги носят название *фундаментальных каталогов*. Наиболее обширным из фундаментальных общих каталогов является каталог Босса (второй), содержащий точные положения 33 342 звезд (1936—1937).

Большую группу звездных каталогов составляют так называемые *дифференциальные каталоги*, которые содержат координаты звезд, полученные путем измерения разностей между ними и координатами звезд фундаментальных каталогов. При составлении этих каталогов могут применяться как меридианные методы, так и фотографирование звездного неба с последующим измерением фотографий. Составление крупнейшего дифференциального фотографического звездного каталога, называемого астрографическим, было начато в 1887 г. и выполнялось 18 астрономическими обсерваториями различных стран. Главное назначение дифференциальных каталогов — определение собственных движений звезд (см. § 156) после того, как фотографирование звездного неба будет повторено спустя значительный промежуток времени.

Кроме точных звездных каталогов, существуют так называемые *обозрения неба*, содержащие приближенные значения координат звезд различных областей звездного неба. Основное назначение таких каталогов — давать возможность отождествлять перечисленные в них звезды с звездами неба. Наиболее известно «Боннское обозрение» (BD), составленное в 1862 г. и содержащее приближенные координаты 324 000 звезд до 10—11-й звездной величины и 23° южного склонения.

§ 37. Применение астрономии в мореплавании и в самолетовождении. Наблюдатель, находящийся в одной из точек земной поверхности, обыкновенно знает с некоторой степенью точности как широту, так и долготу этой точки. Поэтому при определении при помощи астрономических измерений точного значения широты места он может пользоваться знанием приближенного значения долготы, и наоборот, при определении долготы места он может пользоваться приближенным знанием широты.

В иных условиях находится штурман морского корабля или самолета. Конечно, и ему обычно бывают известны приближенные значения широты и долготы его местоположения. Однако точность этих значений недостаточна для того, чтобы он мог применять методы раздельного определения широты и долготы, описанные в § 29 и 32.

Вследствие этого ему приходится определять широту и долготу своего места одновременно. Кроме того, обработка произведенных астрономических измерений в описанных способах требует затраты значительного времени, обременительной в мореплавании и недопустимой в полете.

В связи с этим еще в первой половине XIX в. был разработан способ одновременного определения широты и долготы места наблюдателя на основе измерений высот двух светил, не требующий сложных расчетов. Впервые такой способ был предложен капитаном Сомнером.

Почти одновременно с Сомнером русский военный моряк М. А. Акимов предложил другой способ определения места корабля, более удобный, чем способ Сомнера. Впоследствии способ Акимова был усовершенствован французским адмиралом Сент-Илером и получил широкое применение как в мореходной, так и в авиационной астрономии для определения места корабля (самолета). Основан этот способ на своеобразном применении так называемых кругов равных высот светил.

Если какое-либо светило находится в зените наблюдателя, расположенного в одной из точек земной поверхности, можно, зная склонение и прямое восхождение этого светила, определить географические координаты этой точки. Действительно, для каждого светила, находящегося в верхней кульминации, имеем $\varphi = \delta \pm z$. Но если светило находится в зените, то $z = 0$ и, следовательно, $\varphi = \delta$. Таким образом, широта точки земной поверхности, в которой светило находится в зените, равна склонению этого светила.

Для определения долготы этой точки воспользуемся равенством $t = t_{\text{гр}} + \lambda$, где $t_{\text{гр}}$ — гринвичский часовой угол светила, λ — долгота точки, а t — часовой угол светила в этой точке. Так как в момент кульминации светила имеем $t = 0$, а, кроме того, $t_{\text{гр}} = S_{\text{гр}} - \alpha$, где S — гринвичское звездное время, то $\lambda = t - t_{\text{гр}} = \alpha - S$, т. е. *долгота точки равна разности между прямым восхождением светила и гринвичским звездным временем.*

Точка земной поверхности, для которой светило находится в зените, называется *географическим местом светила*. Эта точка получается при пересечении земной поверхности прямой, проведенной от центра Земли к светилу.

Пусть наблюдатель находится в точке M земной поверхности (рис. 39), не совпадающей с географическим местом светила A . Вследствие большой удаленности светила можно считать, что его лучи SA и $S'M$ параллельны друг другу. Тогда из рисунка видно, что наблюдатель находится от географического места светила на угловом расстоянии, равном зенитному расстоянию светила, т. е. что $\angle MTA = \angle ZMS'$. Если провести на земной поверхности малый круг, центр которого находится в точке A , сферическим радиусом AM , то окажется, что во всех точках этого круга зенитное расстояние светила (а следовательно, и его высота) будет иметь одно и то же значение. Такой круг называется *кругом равных высот*, или *позиционным кругом*.

Если, например, зенитное расстояние светила в какой-либо точке земной поверхности равно 27° , можно утверждать, что эта точка находится на круге равных высот светила, сферический радиус которого равен 27° .

Чтобы узнать, где мы находимся на этом круге, надо взять другое светило и по нему подобным же образом наметить второй позиционный круг. Второе светило имеет иную высоту и зенитное расстояние, для него мы получим иное географическое место и иной радиус позиционного круга (рис. 40).

Так как мы находимся на том и на другом круге, то точка пересечения кругов укажет место нашего положения на Земле. У двух кругов имеются две точки пересечения, но они обычно значительно удалены на Земле одна от другой. Решить вопрос, которая из этих двух точек соответствует нашему положению, не представляет труда, когда мы знаем приблизительно район, в котором находимся. На корабле можно иметь большой земной глобус, на котором и вычертить нужные позиционные круги. Но можно не

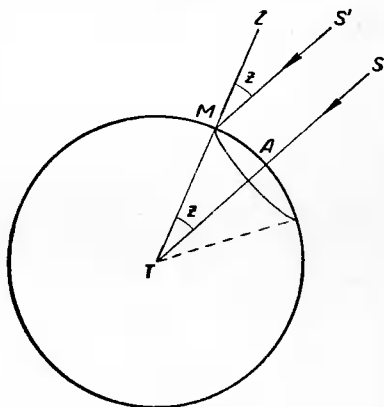


Рис. 39. Географическое место светила и круг равных высот

вычерчивать полных кругов, а наметить только линии вблизи обозначающей точки их пересечения. Имея это в виду, можно пользоваться картой в большом масштабе вместо глобуса.

Радиусы позиционных кругов на Земле очень велики. В самом деле, 1° дуги земного меридиана имеет в длину около 110 км; значит, при сравнительно большой высоте светила, положим 70° , и зенитном расстоянии $90^\circ - 70^\circ = 20^\circ$ радиус позиционного круга получается 2200 км. Поэтому на практике без особой погрешности можно изображать части кругов равных высот на карте большого масштаба в виде прямых линий. Эти отрезки прямых называются

астрономическими *позиционными линиями*.

Каждая из этих линий как дуга окружности перпендикулярна к своему радиусу. Радиус же круга равных высот MA или MA_1 (рис. 40) — это линия на земной поверхности, проведенная от места нашего нахождения к географическому месту светила и лежащая в плоскости круга высоты (ZMS и ZMS_1) светила, которая определяется азимутом светила. Направление радиуса лежит в одной плоскости с направлением на светило. Это значит, что если на карте на-

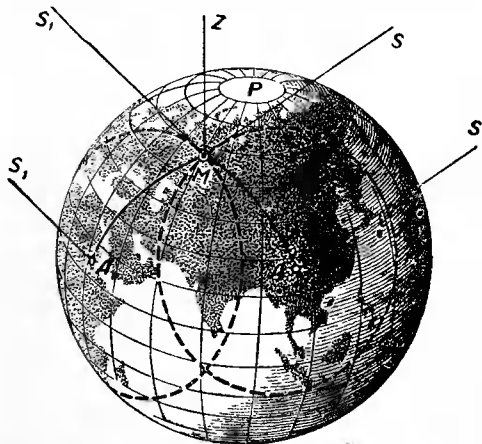


Рис. 40. Определение места по двум кругам равных высот

метить направление по азимуту светила, то позиционная линия будет к этому направлению перпендикулярна.

Чтобы провести позиционные линии как отрезки прямых на карте, мы не можем уже пользоваться географическим местом светила как центром и вычерчивать круги равных высот. Поэтому отмечается на карте приближенное местонахождение корабля или самолета. Оно вычисляется на основании курса самолета, его скорости и протекшего времени.

Вычисленное таким образом «счислимое» место, отмеченное на карте, дает нам приближенную широту и долготу φ_n, λ_n . По показанию часов мы узнаем часовой угол: $t = s - \alpha$. Зная широту φ , склонение δ светила и часовой угол t , мы можем вычислить зенитное расстояние и азимут светила по формулам сферической астрономии:

$$\cos z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos t,$$

$$\sin A = \frac{\cos \delta \sin t}{\sin z}.$$

По большей части счислимое место не совпадает с действительным. Если вычисленное зенитное расстояние больше наблюдаемого, то в действительности мы находимся ближе к географическому месту светила. В этом случае разность между вычисленным и наблюдаемым зенитным расстоянием покажет, как далеко по радиусу круга равных высот мы находимся от счислимого места в сторону светила. Если же вычисленное зенитное расстояние окажется меньше наблюдаемого, то указанная разность будет отрицательной и покажет, как далеко мы находимся от счислимого места в сторону, противоположную от географического места светила. Вместо разности зенитных расстояний можно взять разность высот, только разность высот надо брать обратную: из наблюдаемой высоты вычитать вычисленную.

Азимут и разность между измеренной и вычисленной высотами называют *элементами позиционной линии*.

Зная эти элементы, отмечаем на карте счислимое место $M_{сч}$ и меридиан, проходящий через него. Под углом к меридиану, равным вычисленному азимуту, проводим прямую линию на карте, соответствующую радиусу круга равных высот. Затем откладываем на ней расстояние, соответствующее разности между наблюдаемой и вычисленной высотами в сторону светила при положительной разности или в противоположную сторону при отрицательной разности (рис. 41). При этом принимается $1' = 1,852 \text{ км}$. Из полученной точки проводим перпендикулярно к линии азимута позиционную линию.

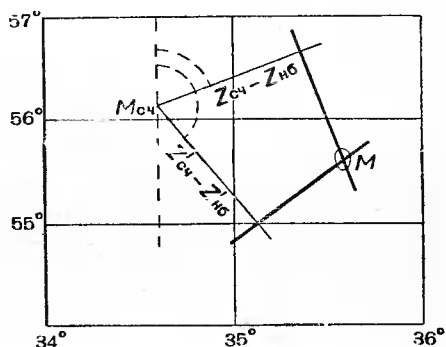


Рис. 41. Проведение позиционных линий

Наблюдая другую звезду и проделав те же операции, что и с первой звездой, проведем на карте вторую позиционную линию. Пересечение двух линий дает расчетное местонахождение M корабля или самолета, используемое для контроля пути. Вследствие движения наблюдателя это место может несколько отличаться от действительного местонахождения корабля.

Результаты получаются точнее всего, если у двух наблюдаемых звезд азимуты отличаются примерно на 90° . Выбор звезд для наблюдений может быть произведен на глаз или при помощи бортовой звездной карты, представляющей собой подвижную звездную карту, поставленную на данный день и час.

В пути высчитывать высоту и азимут светила слишком долго и неудобно. Поэтому перед полетом заготавливаются специальные, заранее вычисленные таблицы.

При дневных астрономических определениях места наблюдателя приходится пользоваться Солнцем. Вторым светилом в этом случае может служить Луна, для которой одновременно с Солнцем может быть также найдена позиционная линия. Под вечер, еще до наступления темноты, можно наблюдать яркие планеты, например Венеру, Юпитер.

§ 38. Секстант. В условиях наблюдений на море с качающейся палубы судна, а тем более с самолета, нужен не только переносный, но и не требующий прочной установки инструмент. Таким и является секстант, при помощи которого можно производить измерения высоты светила, держа его в руке. Это достигается тем, что визирование обоих предметов, между которыми измеряется угол, делается не последовательно, а одновременно, при помощи зеркал, совмещающих оба изображения в поле зрения трубы.

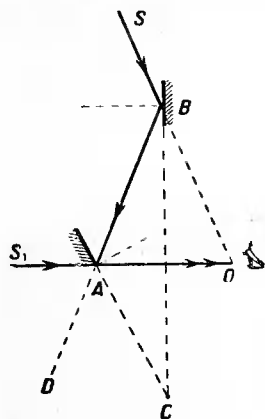


Рис. 42. Схема секстанта

Секстант имеет систему двух плоских зеркал: неподвижное A и подвижное B (рис. 42). Какой-нибудь луч S , идущий от светила, после двукратного отражения от зеркал принимает направление AO , по которому он попадает в глаз наблюдателя. Это направление составляет с первоначальным направлением луча угол SOA , вдвое больший угла между самими зеркалами ACB . Можно убедиться в этом из элементарных геометрических соображений, основанных на свойствах внешних и внутренних углов треугольников:

$$\begin{aligned}\angle AOB &= \angle DAO - \angle ABO, \\ \angle DAO &= 2 \angle CAD, \quad \angle ABO = 2 \angle ABC, \\ \angle AOB &= 2 (\angle CAD - \angle ABC) = 2 \angle ACB.\end{aligned}$$

Если зеркало A покрыто металлом только наполовину, другая половина оставлена прозрачной, то луч S_1 , пройдя сквозь прозрачную часть стекла A , попадет в глаз O по одному направлению с отраженным лучом от предмета S . Тогда получится, что угол зрения между лучами S и S_1 , совмещающимися в глазу наблюдателя, будет вдвое больше, чем угол между зеркалами A и B .

Зеркало A неподвижно и прикрепляется перпендикулярно к плоскости лимба в некотором расстоянии от его центра; зеркало B подвижное и прикрепляется к алидаде в центре вращения. Когда зеркала параллельны одно другому, указатель алидады стоит против нулевого деления лимба. Всякий поворот алидады на определенное число градусов лимба будет соответствовать углу между зеркалами.

При пользовании секстантом берут его за рукоятку так, чтобы лимб расположился примерно в вертикальной плоскости, и направляют трубу на линию горизонта (рис. 43). Другой рукой вращают алидаду с подвижным зеркалом до тех пор, пока изображение светила совместится в глазе наблюдателя с линией горизонта. Показание лимба и дает половину угла высоты светила над линией горизонта. Для измерения высот светил достаточно иметь не полный круг лимба, а только восьмую часть его (вдвое меньше максимальной высоты 90°). Но обычно делается шестая часть круга, почему и самый инструмент называется секстантом (от латинского слова «seх» — шесть) и оцифровывается так, что каждый градус принимается за 2° .

Измерения секстантом не так точны, как производимые при помощи универсального инструмента; зато секстант не требует предварительной установки. Это позволяет получить результат значительно быстрее. Поэтому он получил широкое применение для нужд мореплавания и авиации.

На море пользуются линией видимого горизонта и учитывают так называемое *понижение горизонта*, т. е. угол между плоскостью математического горизонта и направлением касательной от глаза наблюдателя к уровню моря. Этот угол зависит от высоты наблюдателя над уровнем моря и на крупных кораблях достигает $8'$ и более.

В условиях полета нельзя пользоваться таким простым ориентиром, как линия горизонта на море, и для авиации сконструирован секстант иного устройства. В авиационном секстанте внутри прибора помещается уровень с пузырьком (рис. 44) Горизонтальный луч света через объектив трубы, пройдя первую стеклянную пластинку, отклоняется второй под прямым углом и направляется вниз через пузырек уровня к пятигранной стеклянной призме; отражаясь от задней стенки ее, он попадает в окуляр. Пройдя затем через вращающуюся стеклянную пластинку (подвижное зеркало), луч попадает в глаз наблюдателя и позволяет ему видеть пузырек уровня. Поворотом пластинки наблюдатель приводит в поле зрения и светило путем отражения от пластинки. Таким образом, здесь совмещаются пузырек уровня и светило, а разделенный круг показывает угол поворота стеклянной пластинки, положение

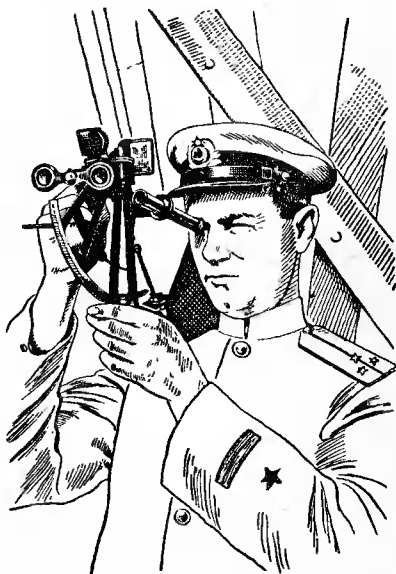


Рис. 43. Наблюдение с секстантом

которой для светила на горизонте соответствует нулевому делению круга. На рисунке показано приспособление в виде темного стекла и светофильтра, которые ставятся на пути лучей при наблюдении Солнца или яркого светила. Ночью пузырек уровня освещается

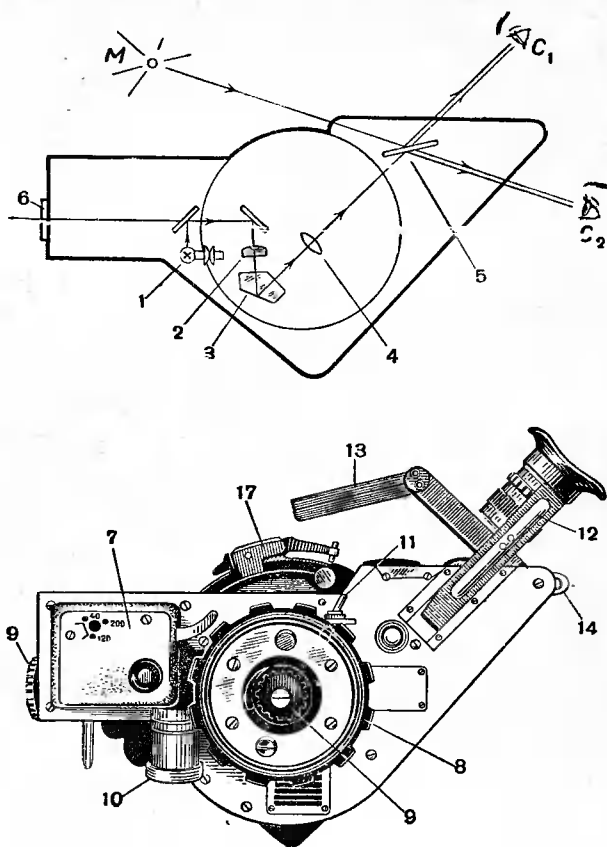


Рис. 44. Авиационный секстант (вверху — схема; внизу — общий вид)

1 — лампочка; 2 — уровень; 3 — пятигранная призма; 4 — коллиматорная призма; 5 — главное зеркало; 12 — окулярная трубка; 13 — два светофильтра

специально приспособленной для этого электрической лампочкой, питаемой батареей. У резервуара уровня имеется приспособление для регулировки размеров пузырька.

§ 39. Применение астрономии в геодезии и картографии. В противоположность приближенным способам определений задачи геодезии, картографии, гравиметрии и др. требуют не только возможно большей точности измерений, но и делаются на земле с более устой-

чивыми и точными инструментами, хотя и переносными, как универсальный инструмент, пассажный и др.

Геодезия имеет своей задачей изучение размеров и общей формы всей земной поверхности в целом (*высшая геодезия*), а также отдельных небольших ее частей, принимаемых по малости плоскими (топография). Геодезия имеет большое практическое значение, в особенности при составлении географических карт и планов, играющих исключительную роль в народном хозяйстве и в деле обороны страны (см. гл. V).

Одной из важнейших геодезических работ является определение *астрономических пунктов*, в которых инструментально с особой точностью определяются широта и долгота из астрономических наблюдений. Эти пункты служат исходными, или опорными, для топографических съемок. Поэтому они закрепляются на местности теми или иными знаками, рассчитанными на сохранность в течение долгого времени.

Координаты места на Земле, определенные из астрономических наблюдений и геодезическими измерениями, т. е. измерениями расстояний до данных мест от некоторой исходной точки на Земле, для которой географические координаты известны, отличаются друг от друга в тех местах, где сила тяжести отклоняется от своего теоретического направления или, иначе говоря, там, где существуют аномалии силы тяжести. Учет этих разностей между астрономически определенными и геодезическими координатами дает возможность вычислить отклонения отвеса. Изучение же отклонений отвеса и аномалии силы тяжести приводит к определенным заключениям о физическом строении земной коры, а в отдельных случаях — о залежах полезных ископаемых, как железные руды, каменный уголь, нефть. Во всех указанных работах и имеет применение сферическая и практическая астрономия.

Исключительно важно иметь точные карты нашей обширной страны в условиях строительства коммунизма. Поэтому уже в 1919 г. декретом Совета Народных Комиссаров было учреждено Высшее геодезическое управление с картографическим отделом, реорганизованное в 1935 г. в Главное управление геодезии и картографии, возглавившее все работы по картографированию страны.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ

§ 40. Видимые движения планет. Еще в древние времена было замечено, что существуют особенные звезды, как бы все время блуждающие по небу среди других звезд. Эти особенные звезды древнегреческие наблюдатели называли *планетами* (от греческого слова «планаомай» — блуждаю). Они подметили, что планеты движутся, как Солнце и Луна, по созвездиям зодиака. Тогда были известны только пять планет: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн; планеты же Уран, Нептун и Плутон были открыты уже в XVIII—XX вв. Но к планетам тогда относили также Солнце и Луну.

Планеты названы именами римских богов: быстро движущийся, «проворный» Меркурий — бог торговли; блестящая Венера — богиня красоты; Марс — бог войны (планета так названа, очевидно, за ее красноватый цвет); Юпитер — бог неба и, наконец, Сатурн — бог времени. Эти латинские названия планет сохранились и до нашего времени.

Видимые движения планет в общем сложнее движений Солнца и Луны. Тогда как Солнце и Луна перемещаются среди звезд все время в направлении, противоположном видимому суточному вращению, планеты перемещаются то против суточного вращения, то в направлении суточного вращения. Первое перемещение, при котором прямое восхождение (α) и эклиптическая долгота (λ) увеличиваются, названо *прямым* движением; второе, при котором α и λ уменьшаются, названо *попятным* движением. Планета при этом описывает петли, как это видно на рисунке 45. Меняя прямое движение на попятное и обратно, планета как бы останавливается — такое положение ее называется *стоянием*. По их видимым движениям планеты делятся на две группы. Одни из них, называемые *нижними планетами*, к которым относятся Меркурий и Венера, бывают видимы на небе недалеко от Солнца: либо по вечерам после захода Солнца в западной стороне неба (восточное удаление от Солнца), либо перед восходом Солнца в восточной стороне (западное удаление от Солнца).

Положение, при котором планета имеет ту же эклиптическую долготу, что и Солнце, называется *соединением* ($\odot$) планеты с Солн-

цем. Соединение, при котором планета движется прямым движением, называется *верхним соединением*; соединение, при котором планета движется попятным движением, называется ее *нижним соединением*. Угловое расстояние на небе между планетой и Солнцем называется *элонгацией* планеты. У Меркурия и Венеры элонгации изменяются в определенных пределах: после верхнего соединения планета движется к востоку, обгоняя Солнце, достигает наибольшей восточной элонгации, затем поворачивает обратно к западу (навстречу Солнцу),

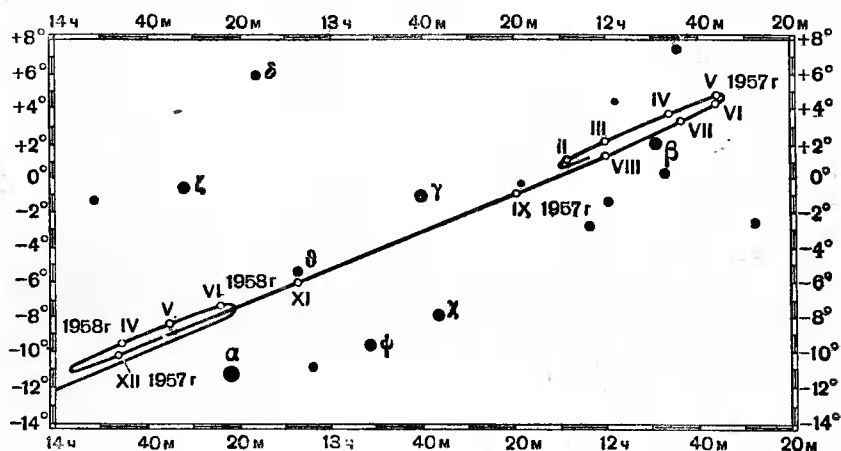


Рис. 45. Видимый путь планеты Юпитер среди звезд в 1957—1958 гг. (римскими цифрами означены месяцы)

проходит через нижнее соединение, достигает наибольшей западной элонгации, потом поворачивает снова к востоку и нагоняет Солнце в момент верхнего соединения. Наибольшая элонгация Меркурия колеблется от 18° до 28° , наибольшая элонгация Венеры — от 43° до 48° .

Видимые движения верхних планет, к которым относятся Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон и все малые планеты, представляются в ином виде. После соединения с Солнцем восход каждой из этих планет наступает все раньше и раньше, чем восход Солнца. Замедляя свое перемещение среди звезд (рис. 45), планета останавливается (*стояние*). Затем начинает перемещаться обратно с возрастающей скоростью. Ее удаление от Солнца все растет, пока разность долгот верхней планеты и Солнца не достигнет 180° . Это положение называется *противостоянием* планеты, или *оппозицией* ($\odot^\circ$).

В этом положении планета восходит около времени захода Солнца, кульминирует в полночь, всю ночь она над горизонтом — наиболее благоприятное время для наблюдений планеты. Проме-

жуточное положение между соединением и противостоянием при удалении планеты от Солнца на 90° называется *квадратурой*. После противостояния попятное движение планеты начинает замедляться до тех пор, пока снова наступит стояние планеты, после него планета вновь начинает двигаться среди звезд со все возрастающей скоростью, но уже прямым движением. Планета опять описывает петлю, но уже среди других звезд и т. д. У верхних планет, таким образом, возможно только одно соединение с Солнцем, у нижних планет — два соединения и не может быть противостояния.

Промежуток времени между двумя последовательными соединениями или противостояниями называется *синодическим периодом обращения планеты*, или просто синодическим обращением.

Таблица 1

В таблице 1 приведены синодические периоды обращений S планет (в сутках), средние значения дуг попятных движений D (в градусах) и продолжительности последних N (в сутках).

Планета	S	D	N
Меркурий	116	12	17
Венера	584	16	41
Марс	780	15	70
Юпитер	399	10	119
Сатурн	378	7	136
Уран	370	4	150
Нептун	367	3	158
Плутон	366	2	163

§ 41. Система мира Птолемея. Стремление объяснить видимые петлеобразные движения планет среди звезд привели еще древних греков к построению системы мира,

которая изложена в знаменитом труде Птолемея «Альмагест». По представлению Птолемея, Земля шарообразна и исчезающе мала сравнительно со сферой неподвижных звезд, в центре которой Земля покоится неподвижно.

Птолемей старался положение о неподвижности Земли привести в связь с современными ему физическими знаниями и механическими представлениями. Он, например, утверждал, что наблюдения таких явлений, как полет птиц, движение брошенных тел, облаков и т. д., решительно доказывают неподвижность Земли (закон инерции был высказан почти полторы тысячи лет спустя).

Исходя из пифагорейского принципа равномерного и кругового движения небесных светил, Птолемей дал свое объяснение видимого движения планет. Каждая планета движется по кругу, называемому *эпициклом*, равномерно; центр эпицикла движется в свою очередь по гораздо большему кругу, называемому *деферентом* (рис. 46). Неподвижная Земля покоится внутри деферента. Все плоскости деферентов проходят через центр Земли и наклонены друг к другу под различными углами, равно как и плоскости эпициклов к соответствующим деферентам. В результате наклона плоскостей орбит планеты описывают петли, а не движутся прямо и обратно по одной линии среди звезд. Около находящейся в центре мира Земли расположен прежде всего круг Луны, затем деференты Меркурия и Ве-

неры, круг Солнца и, наконец, деференты верхних планет (Марса, Юпитера, Сатурна), т. е. в порядке убывания скоростей их видимых движений среди звезд. Все это представление о мире исходило из надуманных, предвзятых идей и не соответствовало действительному движению небесных тел.

Система Птолемея, в свое время удовлетворявшая практическим потребностям предвычисления положения планет, продержалась почти полторы тысячи лет и поддерживалась всеми церковниками. Земля

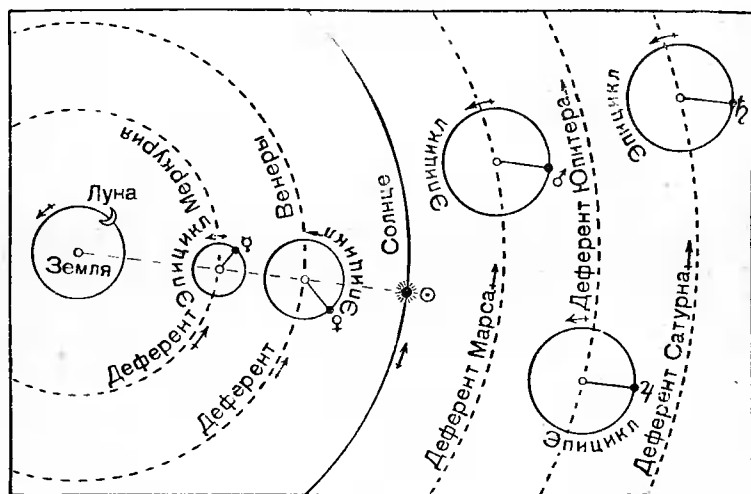


Рис. 46. Движение планет по системе Птолемея

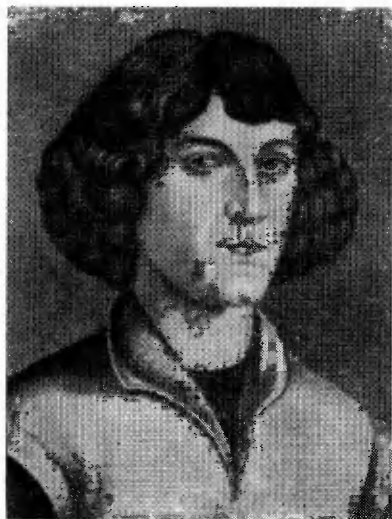
согласно этой системе занимала привилегированное, особое, центральное место в мироздании. Вот какие «доводы» приводили христианские богословы в пользу того, что Земля является центром мира: «Подобно тому, как человек сотворен ради бога, для того чтобы служить ему, так и Вселенная сотворена ради человека, чтобы служить ему; поэтому человек помещен в центре Вселенной».

§ 42. Гелиоцентрическая система Коперника и произведенный ею переворот в мировоззрении. Появление гелиоцентрического учения Коперника в XVI в. и быстрое завоевание им передовых умов человечества можно понять должным образом, только ознакомившись с той исторической эпохой, в которую оно появилось.

Появлению учения Коперника предшествовали великие географические открытия, давшие Европе новые рынки. Неудачные результаты так называемых крестовых походов вызвали поиски новых морских путей в богатые страны Востока, приведшие на рубеже XV и XVI вв. к открытию Америки и к кругосветным путешествиям. Требования, предъявлявшиеся мореплаванием к астрономии, не

могли быть удовлетворены в рамках старой науки. Появление учения Коперника тесно связано с этими вновь возникшими потребностями и общей экономической и культурной революцией той эпохи. Ее Энгельс характеризовал как эпоху, которая нуждалась в титанах и которая породила титанов по силе мысли, страсти и характеру, по многосторонности и учености. Одним из таких титанов по силе мысли и был Коперник.

Коперник родился в городе Торно, или Торунь (Польша), в 1473 г. Учился сначала в Краковском университете, затем в те-



Николай Коперник
(1473—1543)

чение 10 лет в Италии; изучал математику, астрономию, право, медицину, языки — латинский, греческий. Вернувшись на родину, Коперник занял должность каноника, которая была связана главным образом с административной работой по управлению церковным округом, в которой он состоял до самой смерти. Большею частью он жил в небольшом городке Фромборке. Там созрело и окрепло великое учение Коперника о движении Земли.

Большой труд Коперника «Об обращениях небесных сфер» вышел в свет в 1543 г., когда Коперник лежал при смерти. За несколько часов перед смертью он мог осязать первый печатный экземпляр своего великого труда, принесшего ему бессмертие. Он

содержит идеи Коперника о Земле и ее месте в мироздании. В нем трактуются вопросы тригонометрии, сферической астрономии, рассматривается видимое движение Солнца и его объяснение, движение планет и Луны, затмения.

Основное положение своей теории Коперник излагает так: «Необходимо поместить в пространстве, остающемся между выпуклой орбитой Венеры и вогнутой Марса, и вокруг того же центра сферу или орбиту Земли со спутником ее Луной и со всем, что содержится под Луной; ибо мы никаким образом не можем отделить от Земли Луну, столь близкую к ней и для которой в этом пространстве находится вполне достаточное и удобное место. И потому не постыдимся допустить, что лунная орбита и центр Земли в течение года обращаются вокруг Солнца по кругу великому, в центре которого находится Солнце. Солнце мы примем неподвижным, и на этом основании все кажущиеся движения могут быть объяснимы движением Земли. Радиус ее орбиты, как он ни

велик, все же весьма ничтожен сравнительно с расстоянием неподвижных звезд».

Коперник принял совершенно правильный порядок планетных орбит и сумел впервые за все время существования астрономии вычислить относительные расстояния планет от Солнца. Он не сделал попытки заменить равномерное движение планет по круговым эпициклам иным движением. Он прямо говорил: «Не может быть, чтобы простое небесное тело двигалось неравномерно».

Выдвинув представление, что Земля вращается вокруг оси, Коперник шел против того, с чем сжились люди за долгие века, против веками установленных авторитетов. Земля, по мнению Коперника, — простая планета, обращающаяся вокруг Солнца, как и другие планеты. Господствовавшее представление о различии «земного» и «небесного» разрушалось. Отсутствие заметного кажущегося смещения звезд при движении Земли вокруг Солнца, на что указывал Коперник, приводило к представлению о чрезмерно больших расстояниях до звезд, давало, таким образом, указания на огромность Вселенной, могло уже возбудить мысль о бесконечности мироздания.

Коперник несомненно понимал всю революционность своего учения, но в своей книге резко не высказывался. К его книге было написано предисловие математиком Осияндром, который пытался «обезвредить» систему мира Коперника и придать ей характер лишь гипотезы. Но сам Коперник был глубоко убежден в правильности установленной им новой, гелиоцентрической системы мира (от греческого слова «гелиос» — Солнце).

§ 43. Объяснение видимых движений планет. Для объяснения наблюдаемых петель, описываемых планетами, Птолемей создал сложную теорию эпициклов. Астрономы средних веков еще увеличили число этих эпициклов, и в результате получилась очень сложная и явно искусственная теория.

Интересен в связи с этим эпизод с испанским королем Альфонсом Кастильским (XIII в.), большим любителем астрономии. Когда перед ним астрономы раскрыли всю осложнившуюся систему мира, он сказал: «Если бы бог при создании мира спросил меня, я бы посоветовал ему бóльшую простоту». За это он, несмотря на его высокое положение, был обвинен всесильными тогда церковниками в богохульстве, должен был лишиться престола.

Видимые петли, описываемые планетами, Коперник объяснил очень просто движением самой Земли. Рисунок 47 поясняет это: точки $T_1, T_2, T_3, \dots$ изображают положения Земли, S — Солнце, точки $P_1, P_2, P_3, \dots$ — положения планеты на ее орбите, а цифры 1, 2, 3, $\dots$ — положения планеты на небесной сфере. При этом Коперник имел в виду, что линейная скорость Земли больше, чем скорость верхней планеты.

И Земля и планета обращаются вокруг Солнца в одном и том же направлении против стрелки часов, а на фоне звезд планета кажется наблюдателю с Земли перемещающейся то прямым движением (от

1 к 2), то попятным движением (от 2 к 3), затем продолжает прямое среди других звезд, чтобы опять описать петлю в другом месте зодиакальных созвездий. Период повторяемости петель зависит от времени обращения Земли вокруг Солнца и скорости движения планеты по своей орбите.

§ 44. Определение периодов обращений и относительных расстояний планет от Солнца. Простыми геометрическими соображениями Коперник, исходя из основных положений своего учения, определил радиусы планетных орбит или относительные расстояния пла-

нет от Солнца, а также периоды их обращений вокруг Солнца. Например, наибольшее видимое удаление (элонгация) Венеры около 48° ; следовательно, как показывает рисунок 50, в треугольнике V_1TS угол при T

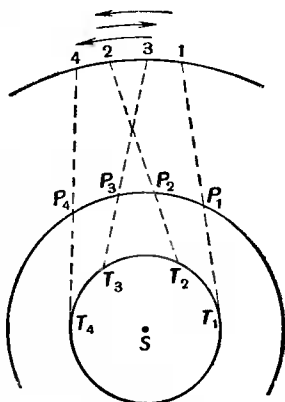


Рис. 47. Объяснение видимых петлеобразных движений планет

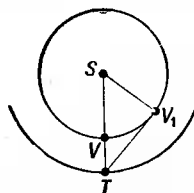


Рис. 48. Определение расстояния до Венеры

равен 48° , а угол при V_1 — прямой, откуда легко найти отношение расстояний Венеры и Земли от Солнца (принимая орбиты за круги):

$$\frac{SV_1}{ST} = \sin 48^\circ = 0,73.$$

Периоды действительных обращений планет вокруг Солнца в пространстве называются *сидерическими*, или *звездными*. Их надо отличать от наблюдаемых *синодических* периодов, т. е. от промежутков времени между одинаковыми соединениями планет с Солнцем (см. § 40).

Определим сидерический период обращения Венеры вокруг Солнца. Во время нижнего соединения Солнце S , Венера V и Земля T находятся приблизительно на одной прямой. За одни сутки угловое перемещение Земли вокруг Солнца равно $360^\circ : 365\frac{1}{4} = 0^\circ,986$, а суточное угловое перемещение Венеры обозначим через x . Следовательно, в одни сутки Венера обгоняет Землю на угловую величину $(x - 0^\circ,986)$. Синодический период обращения Венеры равен 584 суткам. Значит, за 584 суток Венера обгонит Землю

ровно на 360° , и снова наступит нижнее соединение. Вследствие этого мы можем написать:

$$(x - 0^\circ,986) \cdot 584 = 360^\circ,$$

откуда получаем $x = 1^\circ,6$. Отсюда продолжительность обращения Венеры вокруг Солнца есть:

$$\frac{360^\circ}{1^\circ,6} = 225 \text{ дней.}$$

Такие же рассуждения можно применить и к верхним планетам с той только разницей, что в этом случае суточное угловое перемещение верхней планеты меньше суточного углового перемещения Земли, и мы получаем, например, для Юпитера соответственно следующее уравнение:

$$(0,986 - y) \cdot 399 = 360^\circ,$$

где 399 — синодический период Юпитера в сутках. Отсюда $y = 0^\circ,083$ и сидерический период 4333 дней = 11 лет 315 дней.

Зная сидерический период обращения, можно определить относительное расстояние верхней планеты от Солнца.

Положим, что мы наблюдаем противостояние Юпитера, когда он находится в точке J (рис. 49). Прибавим к моменту противостояния 11 лет 315 дней. За этот промежуток времени Юпитер совершит полное обращение вокруг Солнца и вернется в ту же точку J своей орбиты. Но Земля в этот момент будет находиться где-нибудь в точке T_2 , так как она еще не совершила 12 полных обращений. Для 12 полных оборотов Земле недостает угла JST_2 , который она прошла бы за $365 - 315 = 50$ суток. В сутки Земля проходит $0^\circ,986$; следовательно,

$$JST_2 = 0^\circ,986 \cdot 50 = 49^\circ.$$

Значит, в $\triangle SJT_2$ мы знаем угол при S . Угол при T_2 можно найти непосредственно из измерений, определив угловое расстояние на небе между Солнцем и Юпитером во второй вычисленный нами момент, т. е. спустя 11 лет 315 дней после исходного противостояния. Эти наблюдения дают угол, близкий к 120° .

Третий угол в нашем треугольнике будет

$$\angle SJT_2 = 180^\circ - 49^\circ - 120^\circ = 11^\circ.$$

Следовательно, по теореме синусов:

$$\frac{SJ}{ST_2} = \frac{\sin 120^\circ}{\sin 11^\circ} \approx 5.$$

Таким образом, Юпитер приблизительно впятеро дальше от Солнца, чем Земля.

Заметим, что синодический период обращения планеты зависит от сидерического периода не только ее самой, но и Земли. Между этими тремя периодами может быть установлена простая математическая зависимость. Обозначим периоды в сутках: сидерический — через T , синодический — через S , период обращения Земли вокруг

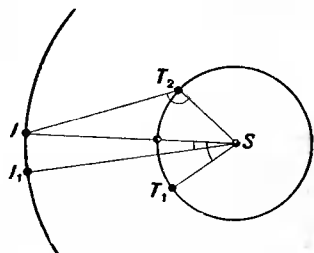


Рис. 49. Определение сидерического обращения Юпитера

Солнца — через E . Разность суточных угловых перемещений нижней планеты и Земли составляет долю синодического периода планеты за одни сутки. Принимая во внимание, что угловое перемещение за полный период составляет 360° , мы можем указанную зависимость выразить соотношениями:

$$\frac{360^\circ}{T} - \frac{360^\circ}{E} = \frac{360^\circ}{S}; \quad \frac{1}{T} - \frac{1}{E} = \frac{1}{S}.$$

Это равенство называется *уравнением синодического движения*. Для верхней планеты разность суточных перемещений обратная, и уравнение имеет вид:

$$\frac{1}{E} - \frac{1}{T} = \frac{1}{S}.$$

Сидерические периоды и относительные расстояния планет приведены в приложениях в конце книги (см. Приложение 5).

§ 45. **Борьба за гелиоцентрическое мировоззрение.** Учение Коперника сначала встретило довольно благодушный прием у высшего римского духовенства, но уже к началу XVII в. было решительно осуждено. Отрицательно отнеслись к этому новому учению и руководители протестантизма. Лютер писал: «Публика прислушивается к голосу нового астролога, который старается доказать, что вращается Земля, а не небеса или небосвод, не Солнце и не Луна. Всякий, кто хочет показаться умным, должен выдумать новую систему, которая из всех систем является, конечно, наилучшей. Такой глупец хочет перевернуть все наши знания по астрономии, но в священном писании сказано, что Иисус Навин приказал остановиться Солнцу, а не Земле».

Чтобы держать в своих руках руководство научной мыслью, духовенство и церковники всегда стремились захватить в свои цепкие лапы власть над университетами и школами и старались подавлять всякое проявление свободомыслия, всякое новшество. Но развитие производительных сил выдвигало передовых людей, борющихся за новые идеи.

Джордано Бруно (1548—1600 гг.) был первым пламенным последователем учения Коперника. В своих сочинениях Бруно нарисовал такую картину Вселенной: «В неизмеримом бесконечном пространстве носятся бесчисленные солнца — звезды, окруженные планетами, подобными тем, которые обращаются вокруг нашего Солнца. Солнце вращается вокруг своей оси, как и Земля. Миры и системы миров Вселенной постоянно изменяются, и все имеют начало и конец; неизменна и вечна лишь лежащая в основе их энергия».

Бруно в очень ясной форме изложил свое учение о множественности обитаемых миров. Он первый гениально распространил идею Коперника на всю Вселенную. Выводы Бруно о множественности обитаемых миров опровергали ходячее воззрение, что Земле и человеку отведено в мироздании привилегированное, исключительное место.

Церковники хорошо поняли всю опасность для них коперникова учения и предприняли против него жестокое гонение: В 1600 г. в Риме Бруно был всенародно сожжен, а в 1616 г. инквизицией было объявлено: «Утверждать, что Солнце стоит неподвижно в центре Вселенной, — бессмысленно, философски неправильно и еретично, так как такое утверждение стоит в явном противоречии со священным писанием. Утверждать, что Земля не находится в



Джордано Бруно
(1548—1600)



Галилео Галилей
(1564—1642)

центре Вселенной, что она не неподвижна и имеет суточное обращение, — бессмысленно, философски неправильно и является по меньшей мере заблуждением в вере». После этого великое учение Коперника сразу же оказалось под строжайшим запретом.

Но еще в 1610 г. появилась книга падуанского профессора Галилео Галилея под заглавием «Звездный вестник». В ней были описаны открытия, произведенные им при помощи телескопа. Эта книга являлась сильным опровержением старых представлений о мире. А в 1632 г. тот же Галилей выпустил еще более опасное для церкви сочинение «Диалог о двух главнейших системах мира, птоломеевой и коперниковой». Изложив его в форме беседы, он вложил всю силу своих доводов в уста сторонника коперниковой системы. Выход в свет этого сочинения произвел величайшее возмущение в среде церковников и всяких обскурантов.

Галилей был привлечен к суду инквизиции и в 1633 г. предстал перед инквизиционным трибуналом. Дальнейшая позорная про-

цедура процесса Галилея достаточно известна: больной, престарелый ученый был измучен допросами и угрозами быть подвергнутым пыткам. Галилей не выдержал, он подписал отречение и этим спас себя от смерти на костре. Но, получив после этого разрешение возвратиться на свою виллу Арчетри близ Флоренции, он и там жил под строгим надзором римской инквизиции до своей смерти в 1642 г.

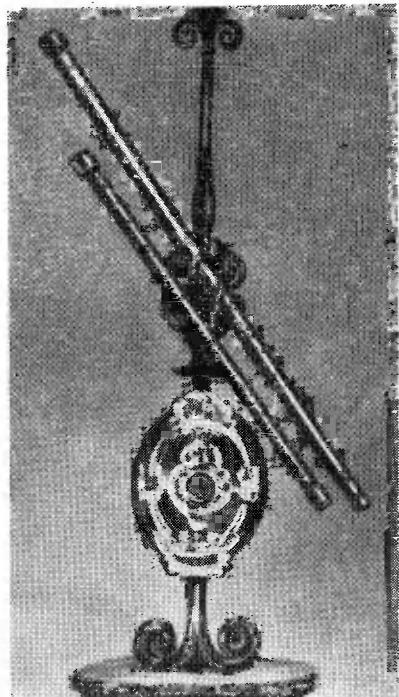


Рис. 50. Трубы Галилея (в музее)

Так в напряженной борьбе со старым мировоззрением, за которое держались религиозные фанатики и реакционеры, закладывались основы новой, подлинной науки.

§ 46. Первые телескопические открытия Галилея. Весной 1609 г. до Галилея дошли слухи о появлении в обращении «голландских зрительных труб». Достать такую трубу ему не удалось, и он решил сам себе сделать подобный инструмент. Если не совсем правильно назвать Галилея изобретателем телескопа, то во всяком случае он был первым, кто направил его на небо и сделал целый ряд астрономических открытий. На рисунке 50 показаны две трубы Галилея, как они хранятся в музее. Первая труба Галилея давала всего 9-кратное увеличение.

Свои телескопические открытия Галилей описал в книге под длинным заглавием: «Звездный вестник, возвещающий о великих и весьма удивительных зрелищах..., каковые наблюдаемы были Галилеем Галилеем и проч. и проч. с помощью недавно изобретенной им зрительной трубы, на лице Луны, в бесчисленных неподвижных звездах, в Млечном Пути, в туманных звездах, в особенности же при наблюдении четырех планет, обращающихся вокруг Юпитера в различные промежутки и периоды с удивительной скоростью, планет, которые до последнего времени никому известны не были и которые автор совсем недавно открыл и решил назвать Медичейскими светилами»¹. Это сочинение появилось в печати в 1610 г. и произвело громадное впечатление. В самом деле, книга Галилея говорила о таких неожиданных открытиях, которые явно

лео Галилеем и проч. и проч. с помощью недавно изобретенной им зрительной трубы, на лице Луны, в бесчисленных неподвижных звездах, в Млечном Пути, в туманных звездах, в особенности же при наблюдении четырех планет, обращающихся вокруг Юпитера в различные промежутки и периоды с удивительной скоростью, планет, которые до последнего времени никому известны не были и которые автор совсем недавно открыл и решил назвать Медичейскими светилами»¹. Это сочинение появилось в печати в 1610 г. и произвело громадное впечатление. В самом деле, книга Галилея говорила о таких неожиданных открытиях, которые явно

¹ Название это он дал в честь Медичи — тогдашних правителей Флоренции.

противоречили учению Аристотеля о совершенстве и неизменности всего «небесного».

Наблюдая Луну (в различных фазах) в свой, хотя и не совершенный, телескоп, Галилей обнаружил, что Луна «не имеет гладкой поверхности, но представляет неровности и возвышения, подобно земной поверхности покрыта огромными горами, глубокими пропастями и обрывами».

Особенно поразило современников Галилея открытие им у Юпитера четырех спутников, которые простым глазом невидимы. Галилей воспользовался этим своим открытием как хорошим аргументом в пользу системы Коперника. Наблюдая в телескоп Венеру, Галилей открыл ее фазы. Это открытие явилось новым аргументом в пользу системы Коперника.

Из других открытий Галилея, описанных в «Звездном вестнике», следует упомянуть еще о разложении им Млечного Пути на множество отдельных, весьма тесно расположенных звезд.

В одном из своих сочинений, опубликованном в 1612 г., Галилей упоминает о солнечных пятнах и вращении Солнца: «... я обратил внимание на темные пятна, появляющиеся на солнечном диске: они, меняя свое положение на нем, указывают или на то, что Солнце обращается вокруг своей оси, или что другие звезды, подобные Венере и Меркурию, обращаются вокруг него, невидимые по своим малым, менее Меркурия, размерам, иначе, как в том положении, когда они становятся между Солнцем и нашим глазом. Продолжительные наблюдения в конце концов убедили меня, что эти пятна суть вещество, связанное с поверхностью солнечного тела; они то появляются на ней в большом количестве, то расплываются, одни быстрее, другие — медленнее, перемещаясь вместе с обращением Солнца вокруг своей оси, что совершается приблизительно в один лунный месяц, — явление, величественное само по себе и еще более важное по своим последствиям».

§ 47. Кеплер и его законы планетных движений. Современник Галилея Кеплер (1571—1640 гг.), прозванный «законодателем неба», родился в маленьком вюртембергском городке Вейле у бедных родителей. Видимо, его замечательные способности обратили на себя внимание, и он получил возможность поступить в университет. Будучи затем преподавателем математики и других предметов, Кеплер сделался горячим последователем учения Коперника. В 1600 г. Кеплер отправился в Прагу к знаменитому в то время астроному Тихо Браге (1546—1601 гг.), замечательному наблюдателю своего времени, хотя и противнику системы Коперника. Тихо Браге построил на небольшом острове Вен, в 22 км от Копенгагена, роскошную обсерваторию. Напомним, что телескопов тогда еще не было, а на угломерных приборах наблюдения производились простым глазом. Измерительные инструменты Тихо Браге во многих отношениях усовершенствовал (рис. 51); улучшил он и методы наблюдений. Поэтому за 20 с лишним лет наблюдений и работы на острове Вен он успел собрать богатейший запас весьма точных

для того времени наблюдений над положениями планет, комет и звезд.

Тихо Браге понимал, что система Птолемея сложна и плохо вяжется с его очень точными наблюдениями. Однако теорию Коперника он отвергал. Он придумал свою собственную систему, согласно которой все планеты движутся вокруг Солнца, а само Солнце вместе с ними движется вокруг Земли.

Система Тихо Браге являлась шагом назад, поворотом к прежнему, к геоцентризму, угодному духовенству. В последние годы своей жизни Тихо Браге был вынужден оставить остров Вен; он обосновался в Праге, куда и пригласил к себе Кеплера.

После смерти Тихо в 1601 г. Кеплеру было поручено продолжение работ, начатых Тихо Браге, в том числе важное дело — составление новых планетных таблиц. Весь богатый запас наблюдений Тихо Браге, в том числе собрание наблюдений над положениями планеты Марс, попал в руки Кеплера, который всю свою энергию сосредоточил именно на исследованиях движения этой планеты. В распоряжении Кеплера находились на-

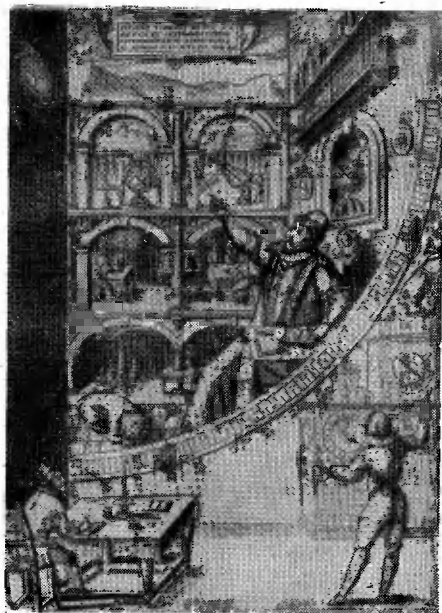


Рис. 51. Квадрант Тихо Браге

блюдения положений Марса в течение 10 противостояний за период времени с 1580 по 1600 г.; затем у него имелись его собственные наблюдения планеты, сделанные в противостояния 1602 и 1604 гг. Плодом девятилетней упорной работы явился труд «Новая астрономия, причинно обоснованная, или физика неба, изложенная на исследованиях о движении звезды Марс по наблюдениям благороднейшего мужа Тихона Браге», изданный в 1609 г.

В этой книге Кеплер устанавливает такой кинематический закон: *площади, описываемые радиусом-вектором планеты, пропорциональны временам*. Этот закон, иногда называемый законом площадей, есть коренное преодоление традиционного учения о равномерности планетных движений. Четвертая часть «Новой астрономии» Кеплера посвящена трудным поискам той истинной орбиты, которую описывает Марс вокруг Солнца.

Кеплер перепробовал много различных кривых; все эти кривые не удовлетворяли наблюдениям. Но наконец он напал на верное ре-

шение, приняв за орбиту Марса эллипс. Тогда наблюдения почти в точности совпали с теорией. При этом Солнце было помещено в один из фокусов эллиптической орбиты Марса и вычисления велись согласно сформулированному выше закону площадей.

В 1619 г. появилось новое сочинение Кеплера: «Пять книг Иоганна Кеплера о гармониях мира». В последней из них Кеплер ставит вопрос о соотношении между расстояниями и движениями планет и формулирует свой третий закон движения планет в таких выражениях: «Во всяком случае теперь самым точным образом и с полной уверенностью установлено, что пропорция между временами периодов каких-либо двух планет в точности равна полуторной пропорции их средних расстояний». В виде формулы это можно записать так:

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{a}{a_1}\right)^{3/2} \text{ или } \frac{T^2}{T_1^2} = \frac{a^3}{a_1^3},$$

где T и T_1 — сидерические периоды обращений двух каких-либо планет, a и a_1 — большие полуоси их орбит.

Открытием этого закона Кеплер блестяще завершил поставленную им задачу и создал основы важнейшего отдела новой астрономии — теоретической астрономии.

В настоящее время три закона, установленные Кеплером, обычно формулируются следующим образом:

Первый закон. *Все планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых (общем для всех планет) находится Солнце.*

Второй закон. *Радиус-вектор планеты в равные времена описывает равные площади.*

Третий закон. *Квадраты времен сидерических обращений различных планет вокруг Солнца пропорциональны кубам больших полуосей их орбит.*

Рисунок 52 иллюстрирует первые два закона Кеплера: Солнце находится в точке S — фокусе эллиптической орбиты планеты. Планету надо себе представлять движущейся от точки P к точке P_1 и далее, т. е. против часовой стрелки. Радиусы-векторы планеты суть прямые SP , SP_1 , SP_2 и т. д. Точка P есть *перигелий*, т. е. точка, в которой планета бывает всего ближе к Солнцу. Точка A на орбите, прямо противоположная P , называется *афелием*. Большая ось



Иоганн Кеплер
(1571—1640)

эллипса, соединяющая точки A и P , носит название *линии апсид*. Большая полуось $a = \frac{SP + SA}{2}$, т. е. среднему между наименьшим и наибольшим расстояниями планеты от Солнца.

Из того, что площади, описываемые радиусом-вектором в одинаковые промежутки времени, равны, следует, что соответствующие дуги орбиты неодинаковы и линейная скорость на орбите меняется так, что наибольшую скорость планета имеет в перигелии, а наименьшую — в афелии.

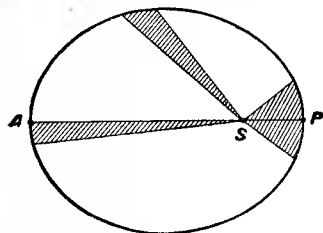


Рис. 52. К объяснению законов Кеплера

Из формулы третьего закона

$$\frac{T^2}{T_1^2} = \frac{a^3}{a_1^3} \quad \text{или} \quad \frac{T^2}{a^3} = \frac{T_1^2}{a_1^3}$$

следует, что если $T_1 = 1$ (году) и $a = 1$ (среднему расстоянию Земли от Солнца), то $\frac{T^2}{a^3} = 1$. Среднее расстояние Земли от Солнца называется *астрономической единицей*. Мы видим, что отношение

квадрата сидерического периода обращения любой планеты к кубу ее среднего расстояния от Солнца должно быть постоянно и равно единице или очень близко к единице, если период обращения выражается в годах, а расстояние — в астрономических единицах.

Три закона Кеплера представляют кинематику так называемого невозмущенного движения планет.

§ 48. Определение расстояний в солнечной системе. Суточный параллакс. Коперник и Кеплер определяли относительные расстояния планет от Солнца, принимая расстояние от Земли до Солнца за единицу. Но сама более или менее точная величина единицы не была известна. Те оценки расстояния до Солнца, которые делались еще Гиппархом и Птолемеем, около 1200 земных радиусов, очень грубы и далеки от действительных. Уже Кеплер заключил из наблюдений над Марсом, что все расстояния в солнечной системе должны быть больше, чем полагали до тех пор.

Одним из следующих достижений новой астрономии в XVII в. и было определение расстояний до Луны, Солнца и планет. При определении расстояний исходили из того, что из двух разных точек на Земле одно и то же светило должно быть видно по разным направлениям и эти направления составляют тем меньший угол, чем дальше светило от Земли.

В самом деле, из точки наблюдения M (рис. 53) светило S видно по направлению MS , а из точки M_1 оно же видно по направлению M_1S ; $\angle S$ или равный ему $\angle M_1SM$ есть угол видимого смещения светила. Очевидно, угол видимого смещения более далекого светила S' для тех же точек Земли соответственно меньше.

Кажущееся смещение светила, обусловленное действительным перемещением наблюдателя, называется *параллактическим смещением* и измеряется углом с вершиной при светиле. Для сравнения расстояний по параллактическим смещениям надо перемещение наблюдателя брать во всех случаях одинаковым. Условились за такое одинаковое перемещение точки наблюдения принимать радиус Земли, т. е. брать два направления к светилу — с поверхности и из центра Земли. Но надо иметь в виду, что параллактическое смещение светила, т. е. угол, опирающийся на радиус Земли в точке наблюдения M (рис. 53), может быть неодинаково в зависимости от высоты светила над горизонтом, хотя расстояние светила от центра Земли остается при этом одно и то же.

Легко сообразить, что параллактическое смещение светила, находящегося в зените, равно нулю. Наибольшее параллактическое смещение имеет светило, когда оно находится на горизонте (S_2 на рисунке 53), т. е. когда луч зрения направлен по касательной к поверхности земного шара и перпендикулярен к радиусу Земли в точке наблюдения.

Суточным горизонтальным параллаксом светила называется угол с вершиной в центре светила и со сторонами, опирающимися на концы радиуса Земли, перпендикулярного к лучу зрения на светило. В этом случае луч зрения расположен в плоскости горизонта места наблюдения. Если принять во внимание сжатие Земли, то наибольший горизонтальный параллакс мы получим для экваториальной точки Земли, где радиус Земли наибольший. В таком случае мы будем иметь горизонтальный *экваториальный параллакс*.

Можно получить математическую зависимость между параллактическим смещением светила при любой высоте над горизонтом и горизонтальным параллаксом, пользуясь рисунком 53. Обозначая радиус Земли через r , параллактическое смещение через p_1 , расстояние от центра Земли до светила через D и принимая во внимание, что $\angle OMS_1 = 180^\circ - z_1$, мы из соотношения между сторонами и углами треугольников MOS_1 и MOS_2 будем иметь:

$$\frac{r}{D} = \frac{\sin p_1}{\sin z_1}; \quad \frac{r}{D} = \sin p,$$

откуда получаем:

$$\sin p_1 = \sin z_1 \sin p.$$

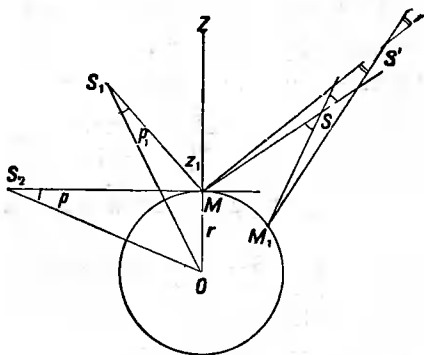


Рис. 53. Параллактическое смещение светила. Горизонтальный параллакс

При малых углах параллактических смещений можно заменить синусы их самими углами и написать:

$$p_1 = p \sin z_1.$$

Если обозначить экваториальный радиус Земли через r_0 , горизонтальный экваториальный параллакс через p_0 , то можно написать:

$$\frac{r_0}{D} = \sin p_0.$$

Сравнивая это выражение с выражением $\frac{r}{D} = \sin p$, получаем формулу приведения горизонтального параллакса для любой точки на Земле к горизонтальному экваториальному параллаксу:

$$\frac{r}{r_0} = \frac{\sin p}{\sin p_0} \quad \text{или} \quad \sin p = \frac{r}{r_0} \sin p_0,$$

где r — радиус Земли в данном пункте, а r_0 — экваториальный радиус.

Заметим, что вследствие параллакса светило кажется нам ниже над горизонтом, чем это имело бы место, если бы наблюдение относилось к центру Земли, причем влияние параллакса на высоту светила пропорционально синусу зенитного расстояния и максимальная его величина равна горизонтальному параллаксу.

Из рисунка 53 видно, что расстояние до светила может быть легко определено, если найден параллакс. В самом деле, прямоугольный треугольник дает следующую связь параллакса с расстоянием:

$$D = \frac{r}{\sin p} \quad \text{или по малости параллакса } p: D = \frac{r}{p \sin 1''}.$$

Здесь множитель $\sin 1''$ вводится, если p выражается не в радианах, а в секундах дуги.

Таким образом, определение расстояния до Солнца, Луны и планет сводится к нахождению горизонтального параллакса. Основная трудность заключается в том, что параллакс обычно очень мал. Наибольший параллакс имеют метеоры, Луна, затем некоторые кометы и малые планеты, иногда очень близко подходящие к Земле в своем движении.

§ 49. Определение расстояний до Луны и Солнца. Для определения параллакса Луны были выбраны два места на земной поверхности, расположенные по возможности на одном и том же меридиане достаточно далеко друг от друга. Особенно удобны оказались такие места, как Кенигсберг (ныне Калининград в СССР) на севере Европы и мыс Доброй Надежды на юге Африки. Луна сначала проходила через меридиан Кенигсберга, а через 8 минут — через меридиан мыса Доброй Надежды.

Поясним способ определения параллакса Луны из наблюдений и для простоты вычислений примем, что Земля имеет строго сферическую форму. Положим, что оба пункта наблюдения A и B расположены в точности на одном меридиане, причем широта пункта A равна φ_1 , а широта пункта B равна φ_2 (+ северная, — южная).

На рисунке 54 S — наблюдаемое светило, ed — земной экватор, линии CZ_1 и CZ_2 — вертикальные линии, проходящие через точки A и B . При наблюдении светила S из пунктов A и B оно видно на разной высоте, и величины его параллактического смещения будут различны. Пусть для точки A оно будет p_1 , а для точки B будет p_2 .

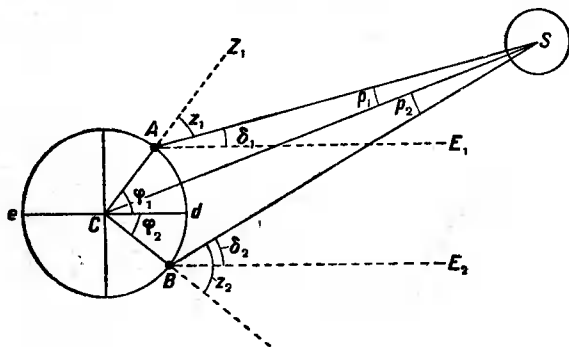


Рис. 54. Определение параллакса Луны

Пользуясь формулой предыдущего параграфа, мы можем написать:

$$p_1 = p \sin z_1 \text{ и } p_2 = p \sin z_2.$$

В этих формулах z_1 и z_2 суть зенитные расстояния центра светила S в момент кульминации, наблюдаемые в пунктах A и B , а p — его горизонтальный параллакс.

Сумма внутренних углов четырехугольника $ASBC$ равна 360° ; следовательно (φ_2 на рис. 54 южная, т. е. отрицательная):

$$p_1 + p_2 + 180^\circ - z_1 + 180^\circ - z_2 + \varphi_1 - \varphi_2 = 360^\circ,$$

$$p_1 + p_2 = z_1 + z_2 - \varphi_1 + \varphi_2.$$

С другой стороны, мы можем написать:

$$p_1 + p_2 = p (\sin z_1 + \sin z_2),$$

откуда получаем:

$$p = \frac{z_1 + z_2 - \varphi_1 + \varphi_2}{\sin z_1 + \sin z_2}.$$

Эта формула уже дает возможность определить горизонтальный параллакс, так как все величины правой части находятся из наблюдений.

Пользуясь тем, что наблюдения производятся в меридиане, мы вместо зенитного расстояния можем в формулу ввести склонение, измененное параллаксом (прямые AE_1 и BE_2 — параллельны экватору):

$$z_1 = \varphi_1 - \delta_1 \quad \text{и} \quad z_2 = \delta_2 - \varphi_2.$$

Формула для горизонтального параллакса примет вид:

$$p = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\sin(\varphi_1 - \delta_1) + \sin(\varphi_2 + \delta_2)}.$$

Однако в этой формуле φ_2 означает абсолютную величину южной широты. Если придать φ_2 знак минус, формула примет вид:

$$p = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\sin(\varphi_1 - \delta_1) + \sin(\varphi_2 - \delta_2)}.$$

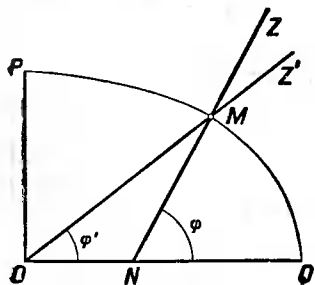


Рис. 55 Геоцентрическая широта

Вследствие нешарообразности Земли при точных вычислениях в формулу надо ввести так называемую геоцентрическую широту φ' . Если на рисунке 55, где O — центр Земли, OP — ось Земли, OQ — направление земного экватора, провести прямую OM к месту наблюдения, то $\angle QOM$ и будет геоцентрической широтой.

Так как географическая широта φ есть угол между отвесной линией, т. е. нормалью к поверхности Земли, и плоскостью экватора, то прямая MZ вообще не проходит через центр Земли.

Разность $\varphi - \varphi'$ невелика (от 0 на экваторе и на полюсах до $11'$ на широте 45°). Она определяется следующей формулой:

$$\varphi - \varphi' = +690'', 6 \sin 2\varphi + 1'', 2 \sin 4\varphi.$$

Параллакс светила может быть определен и из наблюдений его прямого восхождения из одного и того же места на Земле, но в различные моменты. За промежуток времени между этими моментами Земля своим вращением переносит наблюдателя из одной точки пространства в другую, что дает соответствующее параллактическое смещение светила.

Точные наблюдения дали для параллакса Луны величину: $p = 57'2'', 67 \pm 0'',06$. Эта величина — средняя, так как расстояние Луны от Земли все время меняется. Для «среднего расстояния» Луны от Земли получается 384 403 км, или 60,267 экваториального радиуса Земли. В этих определениях ошибка может составлять не более 6 км в ту или другую сторону. Вследствие эллиптичности лунной орбиты и возмущений расстояние между Землей и Луной меняется от 365 до 407 тыс. км.

В последнее время определялось расстояние до Луны методами радиолокации, получением радиозха от Луны. Эти определения, будучи по своей точности не ниже точности астрономических определений, подтвердили полученные ранее результаты измерений.

Непосредственное определение параллакса Солнца дало бы слишком грубые результаты вследствие удаленности Солнца, нагревания инструментов солнечными лучами и пр. Но его параллакс можно вычислить достаточно точно косвенным путем, определяя параллакс какой-нибудь планеты. Это определение и было выполнено в конце XVII в. по наблюдению Марса в его противостоянии, т. е. когда он ближе всего подходит к Земле. При этом был использован способ, аналогичный описанному для определения параллакса Луны.

Определив параллакс Марса в противостоянии, можно найти и параллакс Солнца. Если параллакс Марса p_m , Солнца $p_\odot$, среднее расстояние Земли от Солнца a , Марса от Солнца a_m , то согласно формуле предыдущего параграфа $D = \frac{r}{p \sin l''}$ находим:

$$a = \frac{r}{p_\odot \sin l''} \text{ и } a_m - a = \frac{z}{p_m \sin l''}.$$

Деля второе равенство на первое, получаем:

$$\frac{a_m}{a} - 1 = \frac{p_\odot}{p_m}.$$

Отношение $\frac{a_m}{a}$ было определено еще Коперником; для Марса и Земли оно составляет 1,52 и последнее соотношение дает:

$$p_\odot = 0,52 p_m.$$

В XVIII в. определяли параллакс Солнца, наблюдая прохожде-ние Венеры по диску Солнца в виде небольшого темного кружка. При наблюдениях из двух мест Земли Венера проектировалась на различные места диска Солнца. Проводя одно из таких наблюдений в 1761 г., М. В. Ломоносов первый открыл наличие на Венере значительной атмосферы, о чем будет сказано подробнее в главе VIII.

В дальнейшем стали определять параллакс Солнца по наблюдениям малых планет. Этот последний способ оказался всего удобнее: малые планеты даже в сильные телескопы представляются светлыми точками (как и звезды), а не дисками. Поэтому их положения могут быть определены точнее, чем положение Марса. Малая планета Эрот, открытая в 1898 г., в определенные периоды бывает к Земле ближе, чем Марс (рис. 56). Так, в 1900—1901 гг. Эрот подходил к Земле на расстояние всего 0,315 астрономической единицы. Его с особой тщательностью наблюдали на всех обсерваториях визуально и фотографически. Эти наблюдения были вновь повторены в 1930—1931 гг., когда Эрот подходил еще ближе к Земле.

Как среднее из указанных определений для параллакса Солнца получается значение:

$$p_{\odot} = 8'',803 \pm 0'',001,$$

где $\pm 0'',001$ — возможная ошибка в ту и другую сторону.

По формуле $D = \frac{r}{p_{\odot} \sin 1''}$, если принять радиус Земли $r = 6378,388$ км, находится среднее расстояние Земли от Солнца:

$$D = 149\,450\,000 \pm 17\,000 \text{ км.}$$

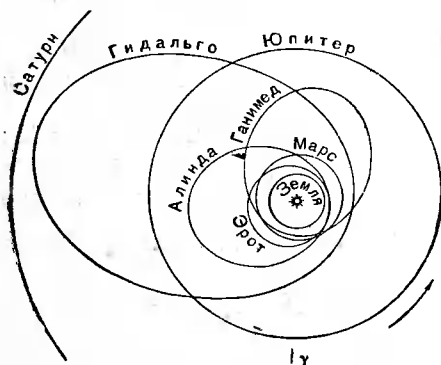


Рис. 56. Орбиты некоторых малых планет

В современных определениях солнечного параллакса применяются не только геометрические методы, основанные на непосредственном измерении параллактического смещения, но и динамические методы, основанные на законе всемирного тяготения, а также физические методы, основанные на скорости света и на принципе Доплера — Физо.

В последнее время получены новые результаты: для величины параллакса Солнца

$8'',790 \pm 0'',001$ и для величины астрономической единицы (среднего расстояния от Земли до Солнца):

$$149\,674\,000 \pm 17\,000 \text{ км.}$$

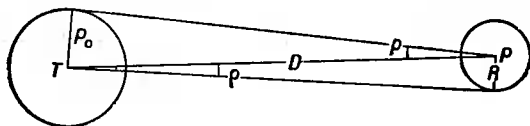


Рис. 57. Определение действительных размеров светила

§ 50. Определение размеров Солнца, Луны и планет. Зная расстояние до светила и определив из наблюдений видимый угловой радиус его p , можно найти действительные размеры этого светила, как это легко видеть из чертежа (рис. 57).

Обозначив через p горизонтальный параллакс, через D — расстояние светила от Земли в момент наблюдения, а через R и R_0 — линейные радиусы планеты и Земли, мы можем написать:

$$\left. \begin{aligned} R &= D \sin p \\ R_0 &= D \sin p \end{aligned} \right\}, \text{ откуда находим: } \frac{R}{R_0} = \frac{\sin p}{\sin p}.$$

Заменяя по малости углов их синусы самими углами, мы можем эту формулу переписать в виде

$$\frac{R}{R_0} = \frac{\rho}{p}, \text{ откуда получаем: } R = \frac{\rho}{p} R_0.$$

Так как радиус Земли в километрах известен с очень большой точностью, то эта формула позволяет нам вычислять радиус светила в километрах. Например, для Луны в среднем:

$$\rho = 15'32'', 6; \quad p = 57'2'', 7; \quad R = 0,2722 R_0 = 3\,476 \text{ км.}$$

§ 51. Доказательства вращения Земли вокруг оси. Коперник, выдвигая положение о вращении Земли вокруг своей оси, не располагал ни одним из современных доказательств этого вращения. Он считал это вращение более вероятным, чем вращение вокруг Земли сферы неподвижных звезд, и старался подтвердить правоту своей точки зрения рассуждениями общего характера. Надо иметь в виду, что во времена Коперника не были известны основные законы динамики, открытые лишь Галилеем и Ньютоном.

В настоящее время наука располагает целым рядом доказательств вращения Земли. При рассмотрении этих доказательств следует вспомнить, что период вращения Земли вокруг оси равен звездным суткам, т. е. $23^{\text{ч}} 56^{\text{м}} 04^{\text{с}},090$ среднего времени. Такому периоду вращения соответствует на экваторе линейная скорость 465 м/сек , а в широтах, отличных от нуля, — та же скорость, умноженная на $\cos \varphi$. Это значит, что с увеличением широты линейная скорость вращения уменьшается пропорционально $\cos \varphi$ и при $\varphi = 90^\circ$ (на полюсе Земли) скорость равна нулю.

Главнейшие доказательства вращения Земли:

1. Отклонение падающих тел к востоку. Уже на основе элементарных соображений можно показать, что тело, свободно падающее с вершины башни, должно упасть не у основания башни, а несколько отклониться в направлении вращения Земли, т. е. к востоку. В самом деле, линейная скорость вершины башни больше линейной скорости ее основания, описывающего за то же время дугу меньшего радиуса. Так как падающее с вершины башни тело стремится по закону инерции сохранить свою первоначальную скорость, то оно должно обогнать основание башни и несколько отклониться к востоку.

В теоретической механике дается вывод следующей формулы, с помощью которой можно рассчитать, на сколько отклонится к востоку свободно упавшее тело, если известны высота башни и географическая широта места падения:

$$y = \frac{2\pi}{3T} \sqrt{\frac{8h^3}{g}} \cos \varphi;$$

здесь y — отклонение упавшего тела к востоку, T — период вращения Земли вокруг оси (звездные сутки), h — высота падения, g — ускорение силы тяжести и φ — широта места.

Из формулы видно, что наибольшее отклонение падающих тел к востоку получается на экваторе ($\cos \varphi = 1$). На полюсах Земли отклонения не получатся совсем. Величина отклонения y чрезвычайно мала по сравнению с высотой h . Во время падения тела на него действуют перемещения воздуха (ветер, вихревые движения воздуха), изменяющие его траекторию. Поэтому опыты над падением тел требуют большой тщательности. Их удобнее всего производить в глубоких шахтах.

Во всех произведенных опытах вычисленные отклонения отличаются от наблюдаемых на сравнительно небольшую величину (не более 10%).

2. Маятник Фуко. В 1851 г. французский физик Фуко поставил опыт с качанием маятника, носящий его имя и являющийся наиболее наглядным доказательством вращения Земли.

Если маятник подвешен так, что он может качаться в вертикальной плоскости, он во все время качания будет сохранять плоскость колебания по закону инерции. При вращении Земли линия земной поверхности, лежащая в той же плоскости, будет поворачиваться вокруг вертикали. Это совершенно очевидно для случая, когда маятник подвешен на земном полюсе. Здесь можно было бы наблюдать, как плоскость колебания маятника совершает за звездные сутки полный оборот относительно поверхности Земли в направлении, противоположном вращению Земли с угловой скоростью 15° в час.

Если маятник подвешен на широте φ (рис. 58), то колебания маятника будут происходить в плоскости, вертикальной для данного места Земли. Вследствие вращения Земли будет наблюдаться поворот плоскости колебания маятника вокруг вертикали в месте M . Угловая скорость этого поворота получится, если взять составляющую вектора угловой скорости вращения Земли на вертикаль в месте M .

Как видно из чертежа (рис. 58), вертикальная составляющая ω_1 угловой скорости вращения Земли ω для места M выражается формулой:

$$\omega_1 = \omega \sin \varphi.$$

Таким образом, угол видимого поворота плоскости колебания маятника относительно поверхности Земли уменьшается с уменьшением широты пропорционально синусу широты.

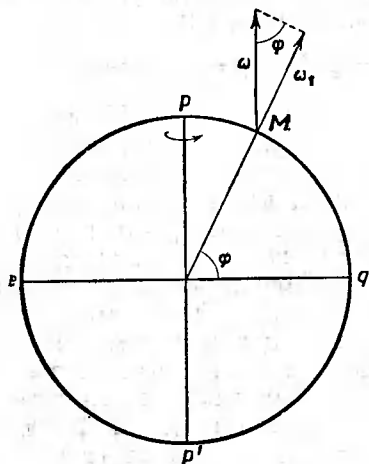


Рис. 58. Схема маятника Фуко

Вращение плоскости качания маятника в северном полушарии происходит по ходу часовой стрелки, смотря сверху, а в южном полушарии — против хода часовой стрелки. На экваторе плоскость качания маятника должна оставаться неизменной относительно земных предметов ($\sin \varphi = 0$), на широте Ленинграда она поворачивается каждый час приблизительно на 13° , в Москве — на $12^\circ,5$.

Для того чтобы маятник качался достаточно долго, его следует брать значительной длины и массы. При этих условиях велика инерция и сравнительно мало тормозящее влияние сопротивления



Рис. 59. Размеры маятника Фуко в Париже и в Ленинграде

воздуха, а кроме того, маятник может колебаться с большой амплитудой, вследствие чего легко можно заметить изменение положения плоскости качания маятника относительно земных предметов.

Фуко поставил свой опыт, вполне оправдавший теоретические расчеты, подвесив маятник в куполе Пантеона, одного из самых больших зданий Парижа того времени. При этом длина маятника была 67 м, а вес его чечевицы — 28 кг. В еще более грандиозном виде опыт Фуко осуществляется, начиная с 1931 г., в Ленинграде в здании бывшего Исаакиевского собора. Там длина маятника равна 98 м, а вес — 60 кг (рис. 59). Амплитуда колебания маятника равна 5 м, а период — около 20 секунд. Вследствие столь огромных размеров маятника острие его чечевицы при каждом следующем возвращении в одно из крайних положений отходит в сторону на 6 мм, что легко уже замечать. Таким образом, все посетители музея могут своими собственными глазами за 1—2 минуты убедиться во вращении Земли. Надо заметить, что даже при длине маятника в несколько метров и при весе груза около 10 кг опыт Фуко проходит в наших широтах достаточно наглядно.

3. Сплюснутость Земли у полюсов. Из законов механики следует, что если бы Земля не вращалась, она должна была бы иметь форму шара. То обстоятельство, что Земля сплюснута у полюсов, может быть объяснено только вращением Земли. С другой стороны, при отсутствии вращения Земли нельзя было бы объяснить, почему воды океанов держатся на экваториальной выпуклости Земли и не стекают к ее полюсам.

В отличие от двух первых доказательств вращения Земли сплюснутость Земли не дает возможности установить направление вращения Земли, хотя и определяет положение оси вращения.

4. Другие явления, связанные с вращением Земли, также объясняемые законами механики, как и приведенные выше доказательства вращения Земли:

а) пассаты — постоянные ветры в тропических областях обоих полушарий, дующие к экватору, под влиянием вращения Земли (с запада на восток) направлены с северо-востока в нашем полушарии и с юго-востока в южном полушарии;

б) отклонение артиллерийских снарядов: в северном полушарии снаряд отклоняется вправо, в южном — влево;

в) подмывание правого берега реки в нашем полушарии и левого — в южном;

г) вихревое движение ветра в циклонах; в северном полушарии ветер в циклоне движется по спирали, направляясь к центру против часовой стрелки, а в южном — по часовой стрелке;

д) обнаруживаемое в спектрах звезд смещение линии по принципу Допплера—Физо при восходе и заходе их;

е) наблюдаемость большого количества метеоров под утро.

§ 52. Годичный параллакс звезд. Движение Земли вокруг Солнца должно повлечь за собой кажущееся параллактическое смещение звезд при наблюдении их в течение года. То, что такого смещения не наблюдалось во времена Коперника и в последующее время, выдвигалось как аргумент против учения Коперника. Но дело в том, что расстояния Земли от звезд так велики по сравнению с диаметром земной орбиты, что перемещение наблюдателя вместе с Землей по ее орбите вызывает чрезвычайно малые изменения в положении звезд, которые никак не могли быть измерены при помощи приборов не только древних астрономов, но и в XVII и XVIII вв. Только немного более ста лет назад (в 1837 г.) впервые были измерены годичные параллаксы ближайших звезд, выражающиеся только в десятых долях секунд дуги. Существование годичного параллакса звезд, а также абберации света обусловлено именно движением Земли и может быть приведено как доказательство движения Земли вокруг Солнца.

Годичным параллаксом звезды называется угол с вершиной в центре звезды и со сторонами, направленными к центру Солнца и к центру Земли при том ее положении на орбите, при котором эта сторона составляет прямой угол с радиусом орбиты. Можно сказать, что годичный параллакс звезды есть угол, под которым

была бы видна со звезды большая полуось земной орбиты. Он обозначается буквой π . Из чертежа (рис. 60) получается формула:

$$\sin \pi = \frac{a}{\Delta} \quad \text{или} \quad \Delta = \frac{a}{\sin \pi},$$

где a — большая полуось земной орбиты, Δ — расстояние звезды от Солнца. Так как угол π , как показали наблюдения, весьма мал, то можно написать:

$$\pi'' = 206\,265 \frac{a}{\Delta} \quad \text{или} \quad \Delta = 206\,265 \frac{a}{\pi''},$$

где π'' — параллакс звезды, выраженный в секундах, а число 206 265 выражает число секунд, соответствующее 1 радиану. Как видно из последней формулы, годичный параллакс обратно пропорционален расстоянию звезды от солнечной системы.

Существование годичного параллакса звезд пытались найти многие астрономы на протяжении XVII и XVIII вв., и лишь в середине XIX в. он был обнаружен из наблюдений с более точными инструментами.

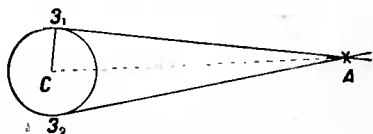


Рис. 60. Годичный параллакс звезд

Первый директор Пулковской обсерватории В. Я. Струве впервые определил параллакс яркой звезды Веги (α Лиры). Полагая, что она должна быть сравнительно близкой звездой благодаря видимому большому блеску, Струве точными измерениями определил годичный параллакс Веги. Затем он опубликовал свои результаты в 1837 г. По следующим измерениям параллакс Веги оказался несколько меньше (около $0'',12$).

Вскоре Ф. Бессель в Кенигсберге (ныне Калининград) определил параллакс слабой звезды «61 Лебеда». Он выбрал ее потому, что она имеет большое собственное движение, являющееся результатом движения звезды в пространстве. То, что это движение заметно с Земли под сравнительно большим углом (около $5''$ в год), указывает на сравнительную близость ее. Действительно, параллакс ее оказался около $0'',3$.

Тогда же Т. Гендерсон в южном полушарии определил параллакс яркой звезды α Центавра и оценил его в $1''$. По современным определениям параллакс α Центавра равен $0'',756$. Еще несколько ближе к нам рядом с ней находящаяся звездочка, которой дали название Проксима — «ближайшая», она имеет параллакс $0'',762$. Это наибольший звездный параллакс, соответствующий наименьшему расстоянию. От Солнца α Центавра отстоит в 272 000 раз дальше, чем Земля. Свет, проходя 300 000 км/сек, идет от нее к нам 4,3 года.

Вследствие годичного параллакса звезда должна казаться описывающей в течение года некоторый эллипс, тем более сжатый,

чем ближе звезда к эклиптике, и тем меньшего размера, чем звезда дальше от нас (рис. 61). Для звезды, находящейся в полюсе эклиптики, этот эллипс обращается в круг; для звезды, лежащей на эклиптике, — в прямую.

Первые определения звездных параллаксов, хотя и не очень точные, сыграли большую роль тем, что не только дали объективное подтверждение движения Земли вокруг Солнца, но и внесли ясное представление о колоссальных расстояниях, на которые распространяется звездная Вселенная.

§ 53. Аберрация света была открыта в 1728 г. английским астрономом Брадлеем в то время, как он пытался найти годичный па-



Рис. 61. Различные параллактические эллипсы звезд

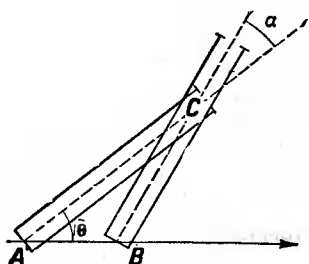


Рис. 62. Схема аберрации света

раллакс (латинское слово *aberratio* значит «отклонение»). Аберрационное смещение есть видимое смещение звезды, обусловленное движением наблюдателя вместе с Землей относительно лучей светила. Направление, по которому мы должны поставить телескоп для наблюдения какой-либо звезды, не совпадает с направлением действительного луча, идущего от звезды к нам (рис. 62). В самом деле, если Земля движется со скоростью, в какой-то мере сравнимой со скоростью света, то пока свет, попав в объектив, дойдет до окуляра, труба успеет вместе с Землей сместиться. Чтобы свет попадал в окуляр, нужно наклонить трубу объективом вперед по движению Земли. Назовем через v скорость Земли по ее орбите, через V — скорость света, а через α — угол наклона телескопа или аберрационное смещение звезды, через θ — угловое расстояние видимого положения звезды от апекса, т. е. от той точки, к которой в данный момент направлено движение Земли.

Беря отношение сторон треугольника ABC и синусов противолежащих углов, имеем (рис. 62):

$$\sin \alpha = \frac{v}{V} \sin \theta.$$

По малости угла α можно написать, выражая его в секундах дуги:

$$\alpha'' = 206\,265 \frac{v}{V} \sin \theta.$$

При $\theta = 90^\circ$

$$\alpha'' = 206\,265 \frac{v}{V}.$$

Принимая $v = 29,77$ км/сек и $V = 299\,796$ км/сек, будем иметь $\alpha'' = 20'',47$. При $\theta = 0$ абберационное смещение $\alpha = 0$.

Таким образом, абберационное смещение звезд связано с движением Земли вокруг Солнца; поэтому самый факт существования абберационного смещения служит доказательством движения Земли по ее орбите. Вследствие того, что орбита Земли — кривая, направление ее движения в течение года непрерывно меняется, а потому меняется и направление абберационного смещения: звезда как бы описывает за год на небесной сфере эллипс. Большие полуоси эллипсов для всех звезд близ полюса эклиптики одинаковы и равны $20'',47$ независимо от расстояния звезды, тогда как большие полуоси параллактических эллипсов имеют различные размеры для звезд разных расстояний и в общем не превосходят $0'',76$. Абберационное и параллактическое смещения еще тем отличаются, что их направления не совпадают, а составляют угол 90° .

§ 54. Видимое движение Луны относительно звезд и ее фазы. С незапамятных времен люди знали, что ночное светило, Луна, перемещается по звездному небу в том же направлении, что и Солнце, т. е. в сторону, противоположную видимому вращению небесной сферы, но быстрее Солнца.

Наблюдая эти перемещения Луны, нетрудно подметить одно-временное изменение ее фаз (видимой формы), положения относительно Солнца и высоты в меридиане. Подобного рода наблюдения привели к точному установлению видимого пути Луны на небе. Оказалось, что плоскость, в которой движется Луна, наклонена под углом в $5^\circ 8'$ к эклиптике.

Скорость видимого суточного движения Солнца среди звезд равна: $360^\circ : 365,25$, т. е. $0^\circ,9856$; соответствующая скорость Луны $360^\circ : 27,3217$, т. е. $13^\circ,1764$, так как Луна завершает свое обращение от какой-либо звезды до той же звезды приблизительно в $27\frac{1}{3}$ суток. Это так называемое звездное, или сидерическое, время обращения Луны, или сидерический (звездный) месяц. В среднем сидерический месяц равен $27^h 7^m 43^s 11^c,47$; но он изменяется на величину до 7^s вследствие сильных возмущений лунной орбиты. Сидерический месяц представляет собой период обращения Луны вокруг Земли.

Фазы Луны постепенно переходят одна в другую в следующей последовательности: *новолуние* (знак $\bullet$) — когда на небе всю ночь совершенно не видно Луны; *первая четверть* (D) — когда мы видим Луну в виде полукруга выпуклостью вправо; *полнолу-*

ние (○) — когда Луна видна полным кругом; *последняя четверть* (☾). — когда Луна видна опять в виде полукруга, но обращенного выпуклостью уже влево.

Из непосредственных наблюдений на небе легко уяснить себе, что фазы Луны зависят от ее положения относительно Солнца. Во время новолуния Луна находится в *соединении* с Солнцем, во время полнолуния — в *противостоянии*. Очевидно, во время

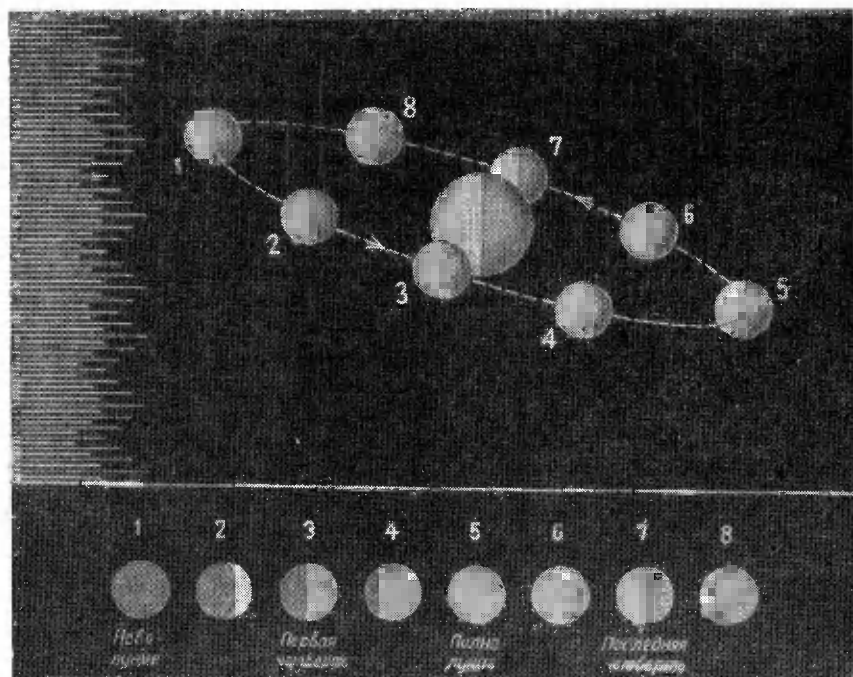


Рис. 63. Фазы Луны

новолуния разность эклиптических долгот Солнца и Луны равна нулю, а в полнолуние эта разность достигает 180° . В том и другом случае говорят, что Луна находится в *сизигии* (греч.). Когда элонгация равна 90° , говорят, что Луна находится в *квадратуре* с Солнцем.

Фазы Луны объясняются взаимным расположением Солнца, Луны и Земли при их движении в пространстве, а также и тем, что Луна собственного света не испускает, а освещается Солнцем (рис. 63).

Промежуток времени, в течение которого сменяются фазы, т. е. между двумя соседними новолуниями, называется *синодическим месяцем*. Вследствие эксцентриситета лунной и земной орбит синодический месяц может меняться в пределах 13 часов. Среднее

его значение равно $29^d 12^h 44^m 2^s,78$ или 29,53059 дня $\approx 29^d,5$ (приблизительно).

То, что синодический месяц длиннее сидерического, объясняется так: за время, в какое Луна обойдет вокруг Земли, сама Земля переместится по своей орбите относительно Солнца, и взаимное расположение этих трех тел будет иное. Это иллюстрируется рисунком 64.

Соотношение между сидерическим и синодическим периодами обращения Луны определяется равенством:

$$\frac{1}{M} - \frac{1}{T} = \frac{1}{S},$$

где M — сидерический месяц (в сутках), T — период обращения Земли вокруг Солнца, S — синодический месяц. Это соотношение, называемое «уравнением синодического движения», может быть объяснено элементарными соображениями: разность $\left(\frac{1}{M} - \frac{1}{T}\right)$ дает ту долю оборота, на которую Луна обгоняет Солнце на небесной сфере за единицу времени; но за синодический месяц она обгоняет Солнце на целое обращение, а потому за единицу времени обгонит на $\frac{1}{S}$ обращения.

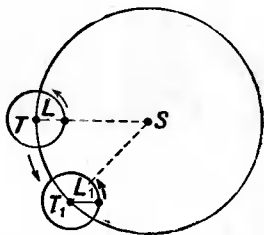


Рис. 64. К объяснению разницы между синодическим и сидерическим месяцами

§ 55. Солнечные и лунные затмения.

Когда Луна при своем движении вокруг Земли становится между Землей и Солнцем, т. е. в новолуние, она может закрыть собой Солнце, и наступит *солнечное затмение*. С другой стороны, когда Земля оказывается между Луной и Солнцем, т. е. в полнолуние, Луна может попасть в тень Земли, и наступит *лунное затмение* (рис. 65). Если бы Луна двигалась по орбите, плоскость которой совпадала бы с плоскостью эклиптики, то солнечные и лунные затмения случались бы в каждый синодический месяц. Но плоскость лунной орбиты наклонена к плоскости земной орбиты под углом в $5^{\circ}8'$; вследствие этого затмения не происходят ежемесячно. Затмение может произойти только тогда, когда Луна во время новолуния или полнолуния окажется на линии пересечения плоскостей орбит Луны и Земли, которая называется линией узлов лунной орбиты.

Пусть T_1, T_2, T_3, T_4 суть четыре последовательных положения Земли в течение года (рис. 66). L_1, L_2, L_3, L_4 — положения Луны на ее орбите. Линия узлов перемещается в пространстве поступательно вследствие движения Земли. Когда Земля находится в T_1 , линия узлов перпендикулярна к радиусу-вектору земной орбиты и Луна в новолуние не может находиться на ней. Точно так же

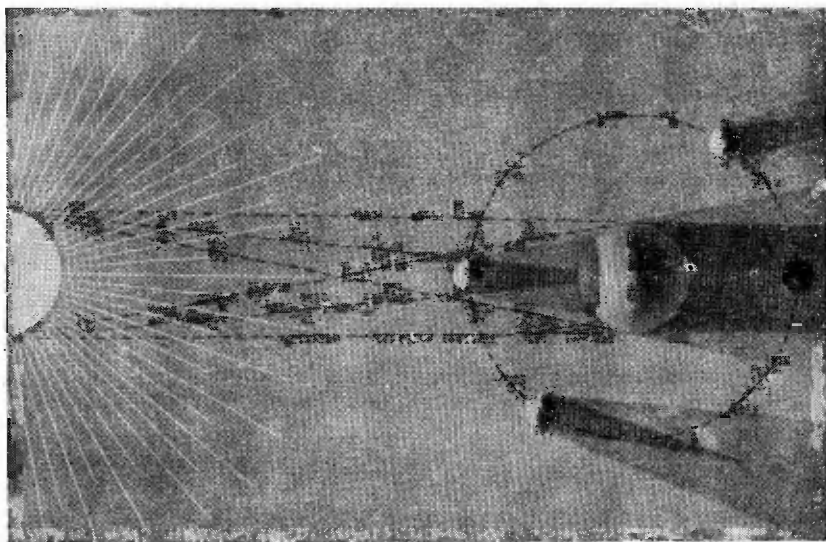


Рис. 65. Общая схема солнечных и лунных затмений

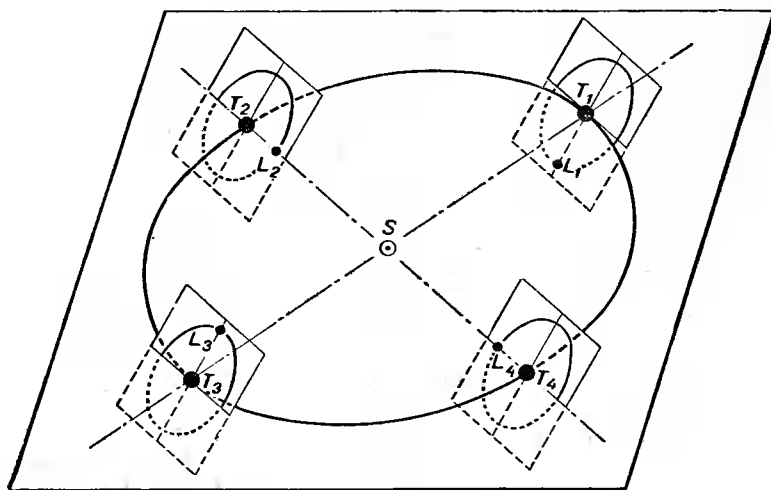


Рис. 66. Условия наступления затмений

Луна не может быть во время новолуния на линии узлов и тогда, когда положение Земли диаметрально противоположно T_1 , т. е. в T_3 .

В положениях же T_2 и T_4 линия узлов проходит через Солнце и потому совпадает с радиусом-вектором Земли. Если Луна будет находиться здесь в новолуние, то в этих положениях произойдут солнечные затмения.

Солнечное затмение может быть трех видов: частное, полное и кольцеобразное. Если Луна только частично закрывает собой диск Солнца, то затмение носит название *частного*. Видимые с Земли размеры дисков Луны и Солнца почти одинаковы (действительный диаметр Солнца почти в 400 раз больше диаметра Луны, но Луна почти в 400 раз ближе к нам, чем Солнце). Эти соотношения могут меняться вследствие изменения расстояний Земли от Солнца и Луны от Земли: то лунный диск будет казаться больше солнечного, то солнечный будет казаться больше лунного. В первом случае может происходить *полное* затмение, т. е. диск Солнца совершенно закрывается диском Луны, во втором — *кольцеобразное* затмение. По этой же причине продолжительность полных солнечных затмений бывает различной.

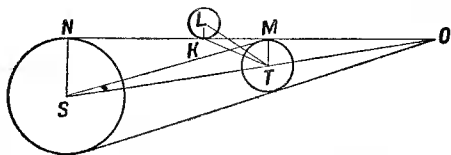


Рис. 67. Положения Солнца, Луны и Земли в момент начала солнечного затмения

Затмения могут случаться и тогда, когда Луна находится не на самой линии узлов, а лишь вблизи нее. Можно вывести предельную величину того угла, на который может отстоять центр Луны от линии Солнце—Земля, когда эта линия совпадает с линией узлов. Пусть на рисунке 67 S есть центр Солнца, T — центр Земли, L — центр Луны; STO есть сечение плоскости чертежа плоскостью эклиптики. Определим максимальную широту β Луны в тот момент, когда край ее коснется линии NO , касательной к поверхностям Солнца и Земли. Искомая эклиптическая широта есть, очевидно, $\angle LTS$. Легко видеть, что $\angle LTS = \angle LTK + \angle KTS$; но $\angle KTS = \angle TKO + \angle KOS$ (как внешний угол треугольника KTO); из треугольника SMO получим, что $\angle KOS = \angle NMS - \angle MSO$, поэтому мы можем написать:

$$\beta = \angle LTK + \angle TKO + \angle NMS - \angle MSO.$$

Угол LTK без особых погрешностей может быть принят за видимую угловую величину радиуса лунного диска, т. е. $R_{\odot} = 15'32''$.

Угол TKO или TKM есть радиус Земли, видимый с поверхности Луны; он может быть принят за горизонтальный параллакс Луны $p_{\odot}$, который, как известно, равен в среднем $57'3''$. Угол NMS на тех же основаниях может быть принят за видимый радиус солнеч-

ного диска, максимальная величина которого доходит до $R_{\odot} = 16'16''$. Наконец, угол MSO есть не что иное, как величина радиуса Земли, видимая из центра Солнца, т. е. параллакс Солнца $p_{\odot} = 8'',8$. Следовательно,

$$\beta = R_{\zeta} + R_{\odot} + p_{\zeta} - p_{\odot} = 1^{\circ}28'42''.$$

Итак, солнечное затмение может начаться даже тогда, когда эклиптическая широта центра Луны достигает почти $1\frac{1}{2}^{\circ}$. Легко определить, на каком угловом расстоянии от узла, считаемом в плоскости эклиптики, должен находиться тогда центр Луны. Дей-

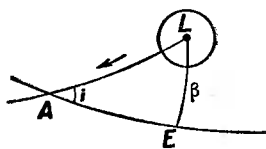


Рис. 68. Определение эклиптической широты Луны в момент начала солнечного затмения

ствительно, пусть на рисунке 68 A есть один из узлов лунной орбиты, часть проекции которой на небесную сферу представляет отрезок AL ; $\cup AE$ есть дуга эклиптики. Пусть при $\beta = 1\frac{1}{2}^{\circ}$ Луна находится в L ; тогда, обозначив угол LAE через i , из прямоугольного сферического треугольника AEL получаем:

$$\operatorname{tg} \beta = \sin AE \operatorname{tg} i.$$

Подставляя значения $i = 5^{\circ}8'$ и $\beta = 1^{\circ},5$, получим расстояние центра Луны от узла по эклиптике, т. е. долготу центра Луны относительно узла; долгота эта оказывается равной почти $16\frac{1}{2}^{\circ}$.

Результат, к которому мы пришли, показывает, что солнечные затмения должны непременно случаться *не менее двух раз в каждом году*. Действительно, мы получили, что затмение начнется и тогда, когда Луна отстоит на $16\frac{1}{2}^{\circ}$ от узла; очевидно, этот результат относится и к тому случаю, когда она находится по другую сторону эклиптики на таком же расстоянии от узла. Поэтому вся область небесной сферы, в которой может произойти затмение, простирается на 33° по долготе. Эту область Солнце, двигаясь по небесной сфере, проходит в промежуток времени около 33 дней. Так как за этот промежуток непременно произойдет хоть одно новолуние, а могут произойти и два новолуния, то затмение непременно произойдет по крайней мере по одному разу, а иногда и по два в каждом из положений Земли T_2 и T_4 (см. рис. 66). Оба эти положения отстоят друг от друга по времени почти на полгода.

Подобный расчет в отношении лунных затмений показывает, что Луна может попасть в конус земной тени тогда, когда находится на расстоянии $11^{\circ},5$ от узла в ту и другую сторону, т. е. в общей сложности 23° . Поэтому лунное затмение случится, только если Луна за тот промежуток времени, за который Солнце пройдет 23° , т. е. почти 23 дня, будет в полнолунии. Но этого может и не случиться, как как промежуток между полнолуниями ($29\frac{1}{2}$ дня) больше 23 дней. Значит, тогда как солнечные затмения слу-

чаются не менее двух раз в год, лунные затмения могут и вовсе не произойти в течение всего года.

Надо заметить, что линия узлов не остается в неизменном направлении, а происходит так называемое движение узлов, вследствие чего периоды затмений наступают ежегодно дней на 20 раньше. Поэтому, если первый период затмений попадет на начало года, то на конец года может попасть уже третий период. Тогда может случиться пять солнечных затмений и два лунных или четыре солнечных и три лунных в один год. Это — максимальное число затмений в году. Чаще бывает два солнечных и два лунных, а минимальное число — два солнечных затмения в течение года.

Солнечные затмения видимы только в тех местах Земли, на которые падает тень или полутень Луны: если место находится в области лунной тени, то затмение Солнца будет полным для этого места; для мест, находящихся в области полутени, то же затмение будет частным. При лунных же затмениях Луна попадает в тень Земли. Поэтому лунные затмения видимы одинаково в один и тот же физический момент везде, где только Луна находится над горизонтом, так как она сама по себе тело темное.

Вследствие движения Луны и суточного вращения Земли лунная тень движется по поверхности Земли. При этом по обе стороны полосы полного затмения бывает видно частное затмение и тем большей фазы, чем ближе место наблюдения находится к полосе полного затмения. Продолжительность полной фазы не может превышать 8 минут. За последние 30 лет полные затмения Солнца наблюдались на территории СССР 19 июня 1936 г., 21 сентября 1941 г., 9 июля 1945 г., 25 февраля 1952 г. и 30 июня 1954 г. Во все эти затмения советскими экспедициями, заранее спланированными и целесообразно размещенными в различных местах полосы затмения, получены очень важные материалы для познания явлений, происходящих на внешних оболочках Солнца. Ближайшее полное солнечное затмение, видимое в Европейской части СССР, произойдет 15 февраля 1961 г. (рис. 69).

Ширина полосы полного затмения бывает различна, в зависимости от отношения высоты конуса тени Луны к расстоянию Луны от Земли; максимальная ширина полосы составляет около 200 км.

Полные лунные затмения вследствие больших размеров земной тени могут продолжаться $1\frac{1}{2}$ —2 часа. Очевидно, кольцеобразных затмений Луны быть не может; бывают лишь полные и частные.

Во время полного затмения Луна обычно бывает не вполне темной. Лучи Солнца, преломленные атмосферой Земли, отчасти освещают ее диск, причем придают окраску Луне, которая бывает различного цвета, преимущественно красного. Иногда цвет бывает красивого металлического оттенка, иногда сероватого. Наблюдения лунных затмений имеют значение для изучения земной атмосферы.

Уже в глубокой древности было установлено, что лунные и солнечные затмения через некоторый промежуток времени повто-

через узел раньше, чем закончит полный оборот вокруг Земли. Драконический месяц содержит в себе 27,2122 дня. Оказывается, что 242 драконических месяца весьма близко подходят по величине к 19 драконическим годам; действительно:

242 драконических месяца	содержат	6585,357 дней
19	» лет	» 6585,780 »

Поэтому, если, например, в некоторый момент Солнце и Луна одновременно проходили через линию узлов, то по истечении почти 6585 дней они снова будут находиться очень близко от нее. Но уже древние заметили, что этот же период 6585 дней содержит почти целое число синодических месяцев: действительно, 223 синодических месяца содержат в себе 6585,3212 дней. По истечении этого промежутка и произойдет повторение затмений. Этот период как раз и есть сарос.

ГЛАВА ПЯТАЯ

З Е М Л Я

§ 56. Шарообразность Земли. Земля по своей форме близка к эллипсоиду вращения, имеющему небольшую сплюснутость у земных полюсов. При решении многих астрономических и геодезических задач с небольшой степенью точности Землю можно принимать за шар. Однако истинная форма Земли очень сложна, и ее изучение продолжается до настоящего времени.

Известны следующие факты, указывающие на шарообразность Земли:

1. Возможность кругосветных путешествий.
2. Кругообразная форма видимого горизонта и увеличение его дальности при поднятии наблюдателя.
3. Постепенное появление из-за видимого горизонта приближающихся предметов.
4. Изменение высоты полюса мира при перемещении наблюдателя к северу или к югу.
5. Изменение местного времени при перемещении наблюдателя по долготе.
6. Круговая форма края земной тени на диске Луны во время лунных затмений.

По существу все эти факты за исключением последнего свидетельствуют лишь о выпуклости Земли, а первый факт (кругосветные путешествия) также и о замкнутости ее поверхности. Однако сравнение расстояния, пройденного наблюдателем вдоль меридиана к северу или к югу, с изменением высоты полюса мира показывает, что во всех местах земной поверхности изменению высоты полюса мира на 1° соответствует приблизительно одинаковое расстояние, в среднем равное 111 км. Это обстоятельство может быть объяснено только шарообразностью Земли, так как только шар обладает тем свойством, что равные дуги его больших кругов стягивают равные углы.

Таким образом, основным доказательством шарообразности Земли следует считать так называемые градусные измерения (т. е. измерения длины дуги в 1° ; см. о них § 64), произведенные на земной поверхности. Лунные затмения, сыгравшие важную роль в утверждении учения о шарообразности Земли в древней Греции,

в настоящее время не могут рассматриваться как точное доказательство шарообразности Земли, так как край земной тени, видимый на диске Луны, размыт и точное определение его формы крайне затруднено.

§ 57. **Дальность видимого горизонта.** Принимая Землю за шар и зная ее радиус, можно определить дальность видимого горизонта, т. е. расстояния до наиболее удаленных видимых точек ровной земной поверхности.

Пусть наблюдатель находится в точке A (рис. 70), на высоте $AD = H$. Прямые AB и AC — касательные к поверхности Земли. Тогда малый круг, проходящий через точки B и C , будет изображать видимый горизонт. Дальность видимого горизонта d изобразится отрезками AB и AC .

Обозначая радиус Земли буквой R , получаем из прямоугольного треугольника ABO :

$$(R + H)^2 = R^2 + d^2,$$

откуда после преобразования находим:

$$d^2 = 2RH \left(1 + \frac{H}{2R} \right).$$

Так как дробь $\frac{H}{2R}$ на практике всегда бывает очень мала, ею можно пренебречь, после чего получаем:

$$d = \sqrt{2RH}. \quad (1)$$

Принимая $R = 6371$ км и выражая d в километрах, а H в метрах, получаем:

$$d = 3,57 \sqrt{H}.$$

При учете влияния рефракции изменяющей ход лучей в земной атмосфере, в последней формуле следует несколько изменить постоянный множитель, после чего она представится в виде

$$d = 3,80 \sqrt{H}. \quad (2)$$

§ 58. **Угол понижения горизонта** есть угол между направлением к видимому горизонту и плоскостью математического горизонта; на рисунке 70 он изображен углом $EAB = \delta$.

Из прямоугольного треугольника ABO имеем:

$$d = R \operatorname{tg} \delta.$$

Отсюда по формуле (1), выведенной в § 57, находим:

$$R \operatorname{tg} \delta = \sqrt{2RH}. \quad (1)$$

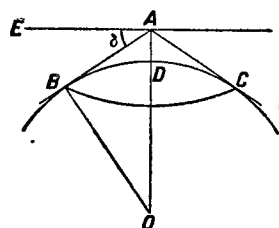


Рис. 70. Дальность видимого горизонта

Принимая (ввиду малости угла δ) $\operatorname{tg} \delta = \delta \operatorname{tg} 1'$ и подставляя числовые значения R и $\operatorname{tg} 1'$, находим:

$$\delta = 1,93 \sqrt{H}, \quad (2)$$

где δ выражена в минутах дуги, а H — в метрах. При учете влияния рефракции вместо последнего выражения получаем:

$$\delta = 1,77 \sqrt{H}.$$

Пользуясь формулами (2), выведенными в § 57 и 58, нетрудно составить следующую таблицу дальности видимого горизонта и угла понижения горизонта:

Высота в м	2	20	200	1000
Дальность горизонта в км	7,6	17	54	120
Угол понижения горизонта	2',5	8',0	25',4	56',9

Из этой таблицы следует, что человек, стоящий на берегу моря, видит на расстоянии не более 7—8 км. Человек, взобравшийся на

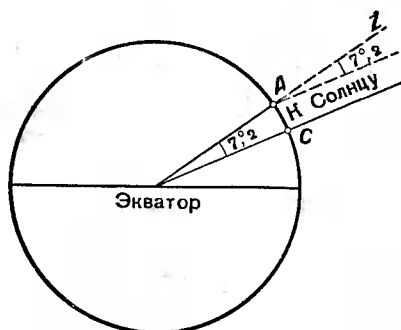


Рис. 71. Измерение Земли по Эратосфену

крышу четырехэтажного дома (высотой около 20 м), видит на расстоянии почти 20 км. Можно рассчитать, что для вершины горы Чатырдаг (Крым), имеющей высоту 1525 м, дальность видимого горизонта равна почти 150 км, а для вершины Эльбруса (5633 м) — 235 км.

§ 59. Первые измерения размеров Земли. Первое исторически установленное определение размеров земного шара принадлежит Эратосфену (276—195 гг. до н. э.), выдающемуся александрийскому географу и астроному. Эратосфен знал, что в городе

Сиене¹, расположенном к югу от Александрии приблизительно на одном с ней меридиане, Солнце в полдень проходит через зенит, так что дно самых глубоких колодцев освещено его лучами.

С другой стороны, Эратосфен при помощи гномона нашел, что в Александрии в тот же день зенитное расстояние Солнца в полдень равно $7^{\circ},2$. Отсюда Эратосфен заключил, что разность широт Александрии и Сиены составляет $7^{\circ},2$, т. е. $\frac{1}{50}$ долю от 360° .

Зная, что расстояние между Александрией и Сиеной равно приблизительно 5000 египетских стадий (это расстояние было определено по времени, требовавшемуся для перехода караванов), Эратосфен нашел, что длина окружности земного меридиана равна $5000 \times 50 = 250\,000$ египетских стадий (рис. 71).

¹ Теперь Ассуан — лежит близко к тропику Рака.

К сожалению, до настоящего времени не удалось установить точную длину египетской стадии. Однако при крайних допустимых ее значениях длина окружности земного меридиана, определенная Эратосфеном (т. е. 250 000 стадий), колеблется от 39 000 до 46 000 км, что довольно близко к действительности. По современным определениям разность широт Александрии и Сиены $7^{\circ},07$, причем Сиена почти на 3° восточнее Александрии.

Легко понять, что результаты, полученные Эратосфеном, могут быть представлены как измерение длины дуги земного меридиана, стягивающей угол в 1° . В связи с этим метод, примененный Эратосфеном для определения размеров Земли, называется *градусным измерением*.

Из ряда последующих градусных измерений, произведенных на протяжении 18 столетий после Эратосфена, следует отметить арабские измерения, произведенные в 827 г. От избранной исходной точки, имеющей широту около 35° , арабские ученые измерили к югу и к северу две дуги по 1° . Одна дуга получилась длиной 56 арабских миль, другая — $56\frac{2}{3}$, что составляет 110,5 км и 111,5 км, соответственно.

Великий хорезмский ученый Абу-Райхан Бируни (972—1048) определил размеры Земли совершенно иным способом, основанным на измерении угла понижения горизонта. Действительно, преобразуя формулу (1), выведенную в § 58, можно получить:

$$R = \frac{2H}{\operatorname{tg}^2 \delta},$$

откуда видно, что радиус земного шара может быть определен, если известна высота H и соответствующий ей угол понижения горизонта δ . Бируни поднялся на вершину горы, имевшей высоту около 100 м, и произвел измерения угла понижения горизонта, определил радиус Земли с ошибкой, меньшей 4%. Для того времени результат, полученный Бируни, имел большое научное значение, однако определить точное значение радиуса Земли таким способом невозможно из-за влияния рефракции земной атмосферы, которое может быть учтено лишь сравнительно приближенно.

Несколько малоудачных попыток определить размеры Земли было сделано в западноевропейских странах в XVI в. Резкий перелом наступил в начале XVII в., когда была изобретена *триангуляция*, давшая возможность заменить непосредственное измерение длинных дуг угломерными работами и тригонометрическими вычислениями сторон сети смежных треугольников.

Большое значение для увеличения точности градусных измерений имело также введение в практику измерения углов зрительными трубами, снабженными окулярами с сеткой нитей. Таким образом была измерена в 1669—1670 гг. дуга парижского меридиана длиной около $1^{\circ},23$. Радиус Земли получился равным 6372 км.

§ 60. Триангуляция. Прежде чем переходить к более подробному рассмотрению вопроса о форме и размерах Земли, ознакомимся

с идеей метода триангуляции, применяемого при современных градусных измерениях.

Пусть требуется определить длину дуги меридиана AB (рис. 72). Эта длина должна быть значительна, так как в противном случае на точности градусного измерения сильно скажутся ошибки определения широт точек A и B , производимого астрономическими методами. Между точками A и B обычно находятся возвышенности, овраги, реки, леса и другие естественные препятствия, мешающие непосредственному точному измерению дуги AB . Назначение метода триангуляции состоит в точном определении длины дуги AB косвенным путем.

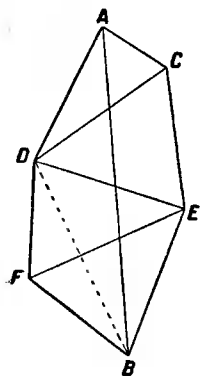


Рис. 72.
Триангуляция

На ровной местности выбирается участок длиной в несколько километров и на нем с возможно большей точностью измеряется длина отрезка AC . Этот отрезок называется *базисом*, и от точности, с которой он измерен, зависит точность всего градусного измерения¹. Далее производятся только измерения углов в треугольниках ACD , CDE , DEF , EFB . При этом, конечно, необходимо, чтобы из каждой вершины этих треугольников были видны две другие вершины. Зная в треугольнике ACD углы и одну из сторон— AC , можно вычислить стороны AD и DC . Подобным же образом можно вычислить в треугольнике CDE сторону DE , в треугольнике DEF — стороны DF и EF и в треугольнике EFB — сторону FB . Если точки D и B соединить прямой, то получается два вспомогательных

треугольника DFB и ADB . Так как в первом из них известны стороны DF и FB и угол при вершине F , можно вычислить третью сторону DB и угол при вершине D . После этого в треугольнике ADB будут известны стороны DA и DB и угол при вершине D , вследствие чего окажется возможным вычислить сторону AB , т. е. искомое расстояние между точками A и B .

Только что приведенные рассуждения справедливы, очевидно, при предположении, что шестиугольник $ACEBFD$ — плоский. Так как в действительности точки A , C , E , B , F и D расположены не в одной плоскости, а на поверхности шарообразной Земли, то задача по определению расстояния между точками A и B решается значительно более сложным путем (к тому же определенные расстояния должны быть приведены к уровню океана). Кроме того, следует иметь в виду, что число промежуточных точек обычно бывает значительно больше, чем на рисунке 72.

Зная длину дуги AB и произведя астрономические измерения широт точек A и B , нетрудно рассчитать, чему равна длина дуги меридиана, стягивающая угол в 1° .

¹ Наиболее точные современные измерения базиса длиной в 10 км производятся с ошибкой, не превосходящей 2 мм.

Для обозначения на местности вершин треугольников строятся специальные сооружения, «пирамиды», называемые *геодезическими знаками*. В случае закрытой местности геодезические знаки строятся высотой в несколько десятков метров и угломерные инструменты устанавливаются в верхней их части. Такие геодезические знаки называются *геодезическими сигналами*. Один из них изображен на рисунке 73.

§ 61. Результаты градусных измерений. Элементы земного сфероиды. Исходя из теоретических соображений, Ньютон показал, что вследствие своего вращения Земля должна иметь форму *сфероиды* (эллипсоида вращения), сплюснутого у полюсов. Предполагая, что Земля состоит из однородной жидкости, Ньютон вычислил величину *сжатия* земного сфероиды. Сжатием сфероиды называют отношение разности его экваториальной и полярной полуосей к экваториальной полуоси, т. е.

$$\alpha = \frac{a - b}{a}.$$

Для величины α Ньютон получил значение $\frac{1}{230}$, что заведомо должно быть больше действительного сжатия Земли вследствие того, что плотность Земли увеличивается с приближением к ее центру. Однако градусные измерения того времени (начало XVIII в.), произведенные французскими геодезистами, противоречили выводам Ньютона. Согласно этим измерениям выходило, что длина дуги меридиана в 1° на севере Франции меньше, чем на юге. Между тем в случае, если бы оказался прав Ньютон и Земля действительно была сплюснута у полюсов, должно получиться обратное, так как наибольшая кривизна (а следовательно, и наименьший радиус кривизны) у меридионального сечения Земли должна быть на экваторе, а наименьшая кривизна (и наибольший радиус кривизны) — на полюсе (рис. 74).

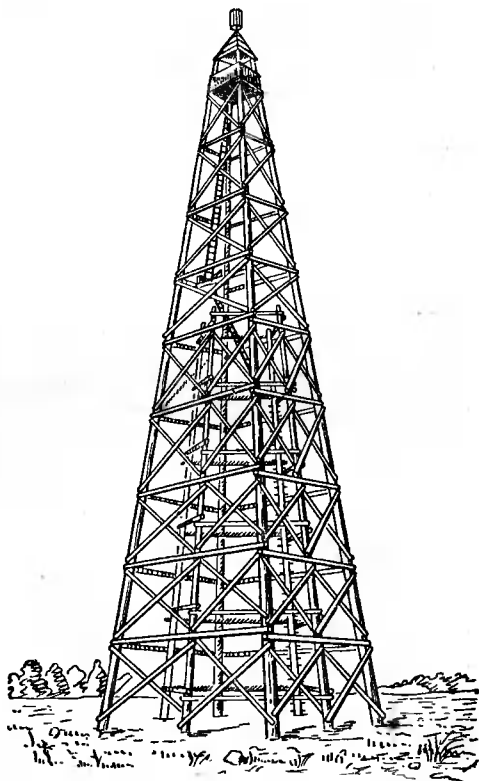


Рис. 73. Геодезический сигнал

После долгих и ожесточенных пререканий между французскими геодезистами и сторонниками Ньютона Парижская академия наук организовала в 1735 г. посылку двух экспедиций: одной — в Перу, на экватор, другой — в Лапландию, на северный полярный круг. Одновременно было произведено новое градусное измерение во Франции. По окончании

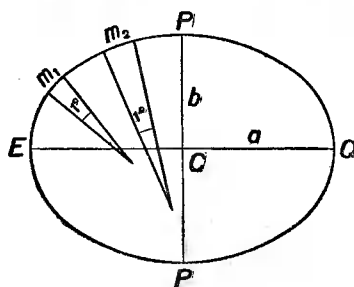


Рис. 74. Кривизна земной поверхности

всех этих работ оказалось, что длина дуги в 1° равна: на экваторе 110,6 км, под Парижем 111,3 км, у полярного круга 111,9 км. Таким образом, сплюснутость Земли у полюсов была подтверждена градусными измерениями.

До настоящего времени в разных странах произведены многочисленные градусные измерения, в результате которых установлено непрерывное увеличение длины дуги меридиана в 1° при перемещении от экватора к полюсам. Самым большим измерением в XIX в.

было русское градусное измерение дуги меридиана от устья Дуная до Северного Ледовитого океана на протяжении 2800 км, от широты $45^\circ 20'$ до широты $70^\circ 40'$, т. е. свыше 25° по меридиану. Руководил этим измерением, которое по своей точности намного превышало точность зарубежных измерений того времени, директор Пулковской обсерватории В. Я. Струве.

В таблице 2 даны значения длин дуг меридиана в 1° для различных широт.

Детальное изучение результатов градусных измерений показывает, что Земля действительно имеет форму, близкую к сфероиду (эллипсоиду вращения).

На протяжении последних полутора столетий различными учеными делались неоднократные попытки определить элементы сфероиды, форма которого наилучшим образом согласуется с наиболее точными градусными измерениями. Некоторые из результатов подобных работ даются в таблице 3.

Первое из приводимых в таблице 3 определений элементов земного сфероиды, выполненное в конце XVIII в., в годы революции во Франции, было положено в основу метрической системы мер, так как за единицу длины — метр — была принята 0,0 000 001 четверти меридиана. Второе определение, выполненное Бесселем, долгое время использовалось при вычислении русских триангуляций. Во второй строке снизу таблицы приведены элементы земного сфероиды, полученные Хэйфордом. Эти элементы были при-

Таблица 2

φ	Длина дуги меридиана в 1° (в км)
0°	110,57
10	110,61
20	110,71
30	110,85
40	111,04
50	111,23
60	111,42
70	111,56
80	111,66
90	111,70

Таблица 3

Элементы земного эллипсоида

Автор	Год	Большая полу- ось в м	Малая полу- ось в м	Четверть ме- ридиана в м	Сжатие
Деламбр	1800	6 375 653	6 356 564	10 000 000	1 : 334,0
Бессель	1841	6 377 397	6 356 079	10 000 856	1 : 299,2
Хэйфорд	1909	6 378 388	6 356 912	10 002 288	1 : 297,0
Красовский	1940	6 378 245	6 356 863	10 002 136	1 : 298,3

няты как лучшие для того времени по международному соглашению 1924 г.

В свое время сфероид Хэйфорда имел неоспоримые преимущества перед предшествовавшими ему сфероидами, так как Хэйфорд располагал значительно большими материалами по градусным измерениям и впервые применил к их обработке теорию изостазии. Однако он получил свои результаты исключительно на основе астрономо-геодезической сети США, в то время как при получении элементов сфероида в Центральном научно-исследовательском институте геодезии, аэросъемки и картографии (находящемся в Москве), помещенных в нижней строке таблицы, Ф. Н. Красовским и А. А. Изотовым были использованы как все материалы Хэйфорда по США, так и большие материалы астрономо-геодезической сети Европы и в особенности нашей обширной страны.

Принимая элементы земного эллипсоида Красовского, можно получить дополнительные данные:

Четверть окружности экватора . . . 10 018 924 м
 Поверхность Земли 510·10⁹ км²
 Объем Земли 1083·10⁹ км³

Рассмотрение элементов земного эллипсоида показывает, что Земля по своей форме мало отличается от шара. Так, на глобусе с экваториальным диаметром в 30 см полярный диаметр Земли оказался бы короче всего лишь на 1 мм, что на глаз было бы совершенно незаметно.

§ 62. Истинная фигура Земли. Различие между элементами земного сфероида, полученными различными авторами, происходит не только вследствие ошибок геодезических измерений. Происхождение этого различия должно быть объяснено также тем, что фигура Земли отлична от эллипсоида вращения, и, следовательно, может идти речь только о том, который из эллипсоидов по своей форме наименее отличается от земной поверхности. В связи с этим делались неоднократные попытки изобразить поверхность Земли более сложной геометрической фигурой, а именно — трехосным эллипсоидом, все три оси которого отличаются одна от другой по длине. Эти попытки приводили, однако, к крайне противоречивым результатам.

В настоящее время эллипсоид Красовского, основанный в значительной мере на советских геодезических работах, принят в СССР как обязательный. При выводе элементов эллипсоида Красовского экваториальное сжатие Земли было принято равным $\frac{1}{30000}$ при долготе наибольшего его меридиана 15° . Указанное в таблице 3 значение большой полуоси относится к экваториальным полудиаметрам с долготой, отличающейся на 45° от долготы наибольшего меридиана. Разность наибольшего и наименьшего экваториальных полудиаметров составляет всего 213 м.

Не подлежит, однако, никакому сомнению, что истинная фигура Земли отлична и от трехосного эллипсоида и вообще не может быть



Рис. 75. Поверхности геоида и эллипсоида

точно представлена ни одной из известных математических поверхностей. При этом надо иметь в виду, что под фигурой Земли следует подразумевать не форму земной поверхности с ее океанами и материками, изрытыми возвышенностями и впадинами, а так называемую поверхность *геоида*.

Представим себе поверхность, нормальными к которой в любой из ее точек являются отвесные линии. Такая поверхность получила название *уровенной поверхности*. Очевидно, что можно провести бесчисленное количество уровенных поверхностей как внутри Земли, так и охватывающих земную поверхность или пересекающихся с ней. Одна из этих уровенных поверхностей, видимая часть которой приблизительно совпадает с поверхностью океанов¹, и называется поверхностью геоида. Продолжая мысленно поверхность океанов под материками так, чтобы эта продолженная поверхность во всех своих точках оставалась уровенной, мы получим полную поверхность геоида.

Можно доказать, основываясь на теории гравитационного поля, что поверхность геоида замкнута и всюду обращена вогнутостью к центру Земли, не имея ни складок, ни каких-либо других резко выделяющихся неровностей. Несомненно также, что поверхность геоида мало отличается от поверхности эллипсоида, как бывало, поднимаясь над поверхностью эллипсоида внутри материков и опускаясь в океанах (рис. 75). Разность уровней геоида и наиболее

¹ В данном случае имеется в виду поверхность океанов, не возмущенная приливами, волнами, ненормальным атмосферным давлением и неравномерным содержанием солей.

близкого к нему по размерам и форме эллипсоида лишь в небольшом числе мест на Земле превосходит 100 м.

Вследствие таких свойств геоида задачу по изучению его фигуры целесообразно расчленить на две составные части: определение элементов эллипсоида, наиболее близкого к геоиду, и определение положения отдельных частей поверхности геоида относительно поверхности эллипсоида.

Изучение фигуры геоида является основной задачей *высшей геодезии*, стремящейся разрешить эту задачу при помощи геометрических измерений, произведенных на поверхности Земли. Основой этих измерений являются триангуляционные сети, покрывающие материки. Эти же триангуляционные сети служат одновременно основой и для топографических съемок, производимых с целью составления географических карт. Уже из одного этого явствует огромное прикладное значение высшей геодезии.

Задача по изучению фигуры геоида может решаться и на основе определения силы тяжести на поверхности Земли. Наука, занимающаяся производством этих определений, называется *гравиметрией*. Преимущество гравиметрических методов изучения формы геоида перед геодезическими состоит в том, что определение силы тяжести можно производить как на материках, так и в океанах. С другой стороны, гравиметрические методы дают возможность определять только форму геоида, но не его размеры. Для получения наилучшего результата по изучению фигуры геоида следует пользоваться обоими методами.

§ 63. Изменение силы тяжести на поверхности Земли в зависимости от широты. В 1672 г. французский астроном Рише, находясь в Кайенне на широте 5° к северу от экватора, заметил, что маятниковые часы, перевезенные им из Парижа (широта 49°), стали отставать на 4^m в сутки. Из механики известно, что полупериод колебания математического маятника T выражается формулой (справедливой для небольших амплитуд колебания маятника):

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1)$$

где l — длина маятника, а g — ускорение силы тяжести. Таким образом, отставание часов могло быть объяснено либо увеличением длины маятника, происшедшим вследствие теплового расширения, либо уменьшением ускорения силы тяжести. Так как тепловое расширение не могло быть столь значительно, чтобы полностью объяснить отставание часов на 4^m в сутки, пришлось допустить, что сила тяжести близ экватора меньше, чем в высоких широтах. Это и было теоретически обосновано 15 лет спустя в «Началах» Ньютона. Рассматривая вопрос о форме Земли в связи с ее вращением, Ньютон доказал, что сила тяжести должна непрерывно уменьшаться от полюсов Земли к экватору. Этот вывод Ньютона был подтвержден многочисленными определениями величины ускорения

силы тяжести в различных точках земной поверхности. Выяснилось, что если ускорение силы тяжести приводить к уровню океана, то в среднем оно зависит только от широты места. Ход изменения средних значений ускорения силы тяжести g_φ (в $см/сек^2$) от экватора к полюсам показан в таблице 4.

Значения ускорения силы тяжести, приведенные в таблице 4, могут быть представлены формулой:

$$g_\varphi = g_0 + (g_{90} - g_0) \sin^2 \varphi, \quad (2)$$

общий вид которой получен теоретическим путем, а значения постоянных g_0 и g_{90} — из наблюдений.

Для того чтобы найти значения g_0 и g_{90} , достаточно определить ускорение силы тяжести в двух каких-либо точках земной поверхности и решить два уравнения вида (2) с двумя неизвестными. Значение g_0 не представляет труда определить и путем непосредственных наблюдений на экваторе. Значение же g_{90} было определено только один раз — советским ученым Е. К. Федоровым в 1937 г. на дрейфующей станции «Северный полюс». Для широты $88^\circ 58'$ было получено ускорение силы тяжести, равное $983,232 \text{ см/сек}^2$, что меньше ускорения силы тяжести на полюсе (т. е. g_{90}) всего лишь на $0,002 \text{ см/сек}^2$.

Разница в ускорении силы тяжести между полюсами и экватором составляет $g_{90} - g_0 = 983,2 - 978,0 = 5,2 \text{ см/сек}^2$. Около $2/3$ этой величины должно быть отнесено к центробежному ускорению на земном экваторе и около $1/3$ — за счет сплюснутости Земли. Различие в весе тел на различных широтах при их взвешивании может быть замечено при помощи пружинных весов, но не при помощи весов с гирями, так как вес гирь, очевидно, будет изменяться в тех же соотношениях, как и вес взвешиваемых тел.

Основываясь на законах гидродинамики, французский математик Клеро доказал теорему, носящую его имя, которая дает зависимость между сжатием земного сфероиды и ускорениями силы тяжести на полюсе и экваторе:

$$\alpha = \frac{5}{2} q - \frac{g_{90} - g_0}{g_0}, \quad (3)$$

где α — сжатие Земли, q — отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести на экваторе, равное $1/289$, а g_0 и g_{90} — по-прежнему ускорения силы тяжести на экваторе и на полюсах.

Пользуясь формулами (2) и (3), очевидно, можно определить величину сжатия земного сфероиды, основываясь исключительно на измерениях силы тяжести. Наиболее современные из таких определений дают для величины α значения, очень близкие к $1/298,3$.

Таблица 4

φ	g_φ
0°	978,0
10	978,2
20	978,7
30	979,3
40	980,2
50	981,1
60	981,9
70	982,6
80	983,1
90	983,2

Определение сжатия Земли может быть также осуществлено астрономическими методами по величине прецессии земной оси (см. § 81) и некоторых возмущений движения Луны. По величине прецессии для сжатия Земли была получена величина $1 : 297,6$, а по движению лунного перигея и узлов — величина $1 : 297,7$. Эти величины находятся в хорошем согласии с геодезическими и гравиметрическими определениями сжатия, а также с изменениями элементов орбит искусственных спутников Земли.

§ 64. Гравиметрические приборы. Измерения ускорения силы тяжести производятся чаще всего при помощи *маятниковых приборов*, называемых так потому, что их основной частью является один или несколько (до четырех) маятников.

Маятниковый прибор устанавливают сначала в точке земной поверхности с известным ускорением силы тяжести g_1 и определяют полупериод колебания маятника T_1 .

Затем прибор перевозят в ту точку земной поверхности, для которой хотят измерить ускорение силы тяжести g_2 , и снова определяют полупериод колебания маятника T_2 . Тогда, пользуясь формулой (5) и считая длину маятника l неизменной, нетрудно найти соотношение

$$g_2 = g_1 \frac{T_1^2}{T_2^2},$$

при помощи которого можно вычислить g_2 .

Такие измерения силы тяжести называются *относительными* измерениями в отличие от *абсолютных* измерений, при производстве которых ускорение силы тяжести измеряется в абсолютных единицах независимо от каких-либо иных измерений силы тяжести в других точках земной поверхности. Абсолютные измерения можно осуществлять при помощи обратного маятника, обладающего двумя взаимно параллельными осями вращения, которым соответствуют одинаковые периоды колебаний. Расстояние между этими осями вращения равно длине математического маятника с тем же периодом колебания. Таким образом, при абсолютных измерениях ускорение силы тяжести вычисляется непосредственно по формуле (5).

Для получения точных значений ускорения силы тяжести необходимо определять продолжительность очень большого числа последующих колебаний маятника, так как в противном случае ошибка определения одного периода будет чрезмерно велика. В настоящее время при определении периодов колебаний маятников широко используются точные (ритмические) сигналы времени, передаваемые по радио (см. главу III). При учете различного рода поправок (на тепловое расширение и др.) современные измерения ускорения силы тяжести маятниковыми приборами производятся с точностью до $0,001 \text{ см/сек}^2$ (до 1 мгал), что составляет приблизительно одну миллионную измеряемой величины.

При производстве относительных измерений силы тяжести чрезвычайное широкое применение получили также приборы, известные под общим названием *статических гравиметров*. Основное достоинство этих приборов состоит в очень небольшой, по сравнению с маятниковыми приборами, затрате времени, идущего на определение силы тяжести (на одно определение — около 5 минут). Сила тяжести в статических гравиметрах, имеющих наиболее широкое распространение, определяется либо путем сравнения с упругой силой газа, заключенного в замкнутом сосуде и имеющего постоянную температуру, либо с упругой силой пружины¹. Хотя реальная точность

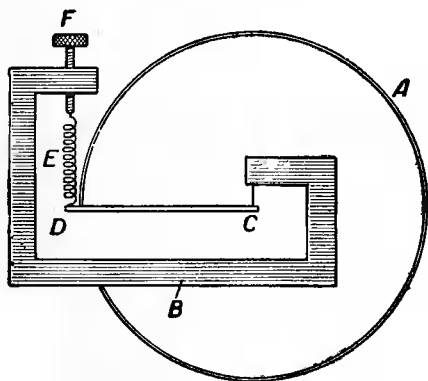


Рис. 76. Схема гравиметра
М. С. Молоденского

определения силы тяжести при помощи гравиметров достигает 0,1 мгл (что в десять раз больше точности маятниковых приборов), заменить маятниковые приборы гравиметры не могут уже по одному тому, что они требуют почти ежедневной проверки на контрольных пунктах.

Один из наиболее точных и надежных гравиметров, имеющих широкое распространение в СССР, сконструирован М. С. Молоденским. Этот гравиметр пружинного типа. Он может применяться также для измерения силы тяжести на дне моря, куда он опускается в водонепроницаемом футляре. Управление ра-

ботой гравиметра и производство отсчетов его показаний осуществляется при помощи телемеханизмов инженером, находящимся на надводном судне.

На рисунке 76 изображена схема гравиметра М. С. Молоденского. Плоская пружина A, имеющая форму окружности, одним своим концом прикреплена к штативу B, а другим — к стержню CD, расположенному горизонтально и подвешенному в точке C на двух проволоках. Другой конец стержня CD подвешен на слабой спиральной пружине E, прикрепленной к микрометрическому винту F. Если диаметр пружины A равен 10 см, то от изменения силы тяжести на один миллигал конец стержня D смещается на 0,0002 мм. Величина такого смещения измеряется при помощи микрометра F, и по ней определяется изменение силы тяжести.

Третьим прибором, служащим для изучения силы тяжести, является *гравитационный вариометр*, основная часть которого

¹ Впервые прибор, предназначавшийся для изучения колебаний силы тяжести по изменению высоты столбика ртути, поддерживаемого давлением замкнутого объема воздуха, имеющего постоянную температуру, был построен М. В. Ломоносовым.

состоит из тонкой нити, сделанной из иридиевой платины, на которой укреплено коромысло с двумя грузиками, подвешенными на концах коромысла на различной высоте (рис. 77). Так как сила тяжести, действующая на эти грузики, неодинакова и по величине и по направлению, коромысло вариометра слегка закручивается. По величине этого закручивания можно судить, как изменяется сила тяжести в различных направлениях. Таким образом, вариометр измеряет не самую силу тяжести, а лишь ее изменения. Правда, путем суммирования изменения силы тяжести между двумя какими-либо точками земной поверхности можно определить и разность значений силы тяжести в этих точках. Точность таких определений может быть значительно выше, чем определений, выполненных при помощи маятниковых приборов, при условии небольших расстояний между точками (в несколько километров).

§ 65. Аномалии силы тяжести. Изостазия. Одно из основных применений гравиметрических приборов всех типов относится к изучению так называемых *аномалий силы тяжести*, т. е. отклонений величины ускорения силы тяжести от средних значений. Аномалия силы тяжести считается положительной, если наблюдаемая сила тяжести больше средней.

Результаты измерения ускорения силы тяжести в различных точках земной поверхности показали, что на одной и той же широте сила тяжести в открытом океане и на материках в среднем приблизительно одинакова. Однако на небольших островах, расположенных одиноко посреди океанов, наблюдается, как правило, положительная аномалия. На материках наблюдаются как положительные, так и отрицательные аномалии силы тяжести, охватывающие значительные области.

Происхождение аномалий объясняется тем, что строение земной коры неоднородно как в отношении видимых наружных масс, горных массивов и т. п., так и в отношении плотностей горных пород, составляющих земную кору. Тем более удивительным является отмеченный факт отсутствия разницы в силе тяжести в океанах и на материках, а также сравнительно незначительное влияние на величину и направление силы тяжести горных массивов. Одним из объяснений, которые были этому даны, является предположение, что неправильности в распределении масс на земной поверхности уравниваются соответствующими неправильностями в распределении плотности внутри земной коры. Если исходить из такого предположения, то приходится допустить, что дно океанов состоит из более плотного вещества, чем материка, что и компенсирует влияние на силу тяжести воды океанов, имеющую плотность, в $2\frac{1}{2}$ раза меньшую средней плотности земной коры. Такое состояние равновесия масс в земной коре получило название *изостазии*.

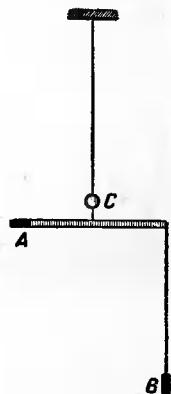


Рис. 77. Схема вариометра

Согласно теории изостазии, основанной на изучении аномалий силы тяжести в самых разнообразных районах земной поверхности, на глубине в среднем около 100 км существует особая урвонная поверхность, названная *изостатической*. Изостатическая поверхность замечательна тем, что давление, оказываемое на нее вышележащими слоями земной коры, во всех ее местах одинаково. Это показывает рисунок 78, на котором кривая *BDF* изображает изостатическую поверхность, испытывающую одинаковое давление столбиков *AB*, *CD* и *EF*. Из рассмотрения рисунка ясно, что наибольшей плотностью должно обладать дно океана в столбике *CD*, а наименьшей — столбик *EF*, проходящий через горный массив. Конечно, компенсация влияния на силу тяжести внешних слоев земной коры за счет влияния внутренних слоев далеко не всегда

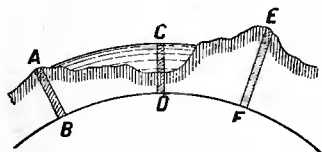


Рис. 78. Изостатическая поверхность

бывает точной, чем и объясняется наличие вышеотмеченных аномалий на островах океанов и на материках.

Существует, однако, ряд мелких неоднородностей строения верхних слоев земной коры, которые не имеют компенсации. Такие неоднородности вызывают местные аномалии силы тяжести, охватывающие небольшие районы и свидетельствующие о нали-

чии залежей ископаемых, обладающих ненормально большой (например, руды металлов) или, наоборот, ненормально малой (например, каменная соль) плотностью. Таким образом, изучение местных аномалий силы тяжести имеет огромное практическое значение, так как в ряде случаев дает возможность не только обнаружить наличие в земле полезных ископаемых, но и изучить их структуру.

§ 66. Геодезические и гравиметрические работы в СССР. Советский Союз получил от царской России скудное наследие в области как геодезических, так и гравиметрических работ. Огромная территория СССР представляла собой площадь, почти не изученную как с точки зрения основных геодезических работ (составления триангуляционной сети), так и в отношении топографической съемки, необходимой для составления географических карт крупного масштаба, а также гравиметрических работ, могущих осветить вопрос о структуре верхних слоев земной коры. Между тем небывалые размеры общего культурного и хозяйственного роста СССР, равно как и специфические потребности строительства на наших новостройках, создали необходимость быстрой и умелой организации геодезических и гравиметрических работ. Этим объясняется создание еще в 1919 г. Высшего геодезического управления ВСНХ (в настоящее время преобразованное в Главное управление геодезии и картографии), широко развернувшего свою деятельность в последующие годы.

Хотя реальное развитие астрономо-геодезических работ в СССР началось только с 1923 г., к настоящему времени уже закончен,

и притом в небывало короткие сроки, ряд больших градусных измерений. Примером может служить измерение дуги параллели Орша—Челябинск — Красноярск — Чита — Хабаровск (средняя широта 54°) протяженностью около 112° , законченное в течение 12 лет¹.

Одновременно с геодезическими работами в СССР производились работы по измерению силы тяжести, получившие особенно широкий размах с 1932 г., когда началась общая *гравиметрическая съемка* страны, покрывшая всю территорию СССР непрерывной сетью гравиметрических пунктов со средним расстоянием один от другого около 30 км.

Как геодезические, так и гравиметрические работы в нашей стране находят себе практическое применение в ближайшее время, так как служат основой для картографических работ и геологической разведки полезных ископаемых. Но осуществление этих работ дало также возможность заново пересмотреть главный вопрос высшей геодезии — вопрос о земном сфероиде, наиболее близком по своей фигуре к геоиду. Исследования Ф. Н. Красовского дали возможность получить лучшие из существующих элементы земного эллипсоида, на основе которых в настоящее время в СССР производятся все геодезические и картографические работы.

Совершенно бесспорно, что все работы советских геодезистов и гравиметристов имеют не только крупное государственное, но и международное значение, выдвигающее советскую науку в области геодезии и гравиметрии в первенствующее положение.

§ 67. Измерение массы и средней плотности Земли. Наиболее старый метод определения массы Земли, предложенный еще Ньютоном, был впервые применен на практике в 1736 г. Этот метод состоял в сравнении массы Земли с массой изолированно расположенной горы. Для возможности осуществления такого сравнения необходимо было произвести измерения отклонения отвеса, вызы-



Ф. Н. Красовский
(1870—1948)

¹ Для сравнения можно указать, что, например, трансконтинентальное градусное измерение в США протяженностью в 49° производилось в течение 27 лет.

ваемого притяжением горы, найти массу горы и расстояние до точки приложения равнодействующей сил притяжения груза частицами горы. Масса Земли, полученная по изложенному способу, определялась сравнительно грубо, и самый способ представляет в настоящее время лишь исторический интерес.

Значительно более точные результаты по определению массы Земли дают лабораторные способы, смысл которых заключается в определении гравитационной постоянной f .

Первый из этих способов, впервые примененный в 1798 г. Кэвендишем, использует для определения f крутильные весы. Два небольших шарика b и b' (рис. 79) прикрепляются к концам легкого

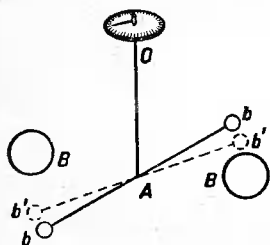


Рис. 79. Схема крутильных весов

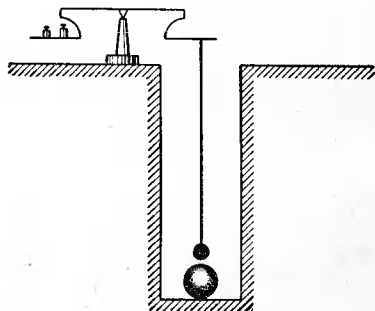


Рис. 80. Схема весов Йолли

стержня или коромысла, подвешенного на кварцевой нити OA . При приближении к шарикам двух массивных шаров B и B' стержень поворачивается в горизонтальной плоскости, подчиняясь притяжению этих шаров, и занимает положение $b'b'$. Упругость кварцевой нити определяется предварительно из наблюдений периода крутильных колебаний коромысла с грузами, момент инерции которого вычисляется по массе грузов и длине коромысла. По углу поворота стержня (т. е. по величине закручивания кварцевой нити) можно определить силу взаимного притяжения шаров B и b .

Введем обозначения m_1 и m_2 — масса шаров B и b , d — их расстояние друг от друга, F — сила их взаимного притяжения. Тогда из равенства

$$F = f \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad (1)$$

можно определить единственную неизвестную величину f .

В другом лабораторном способе определения гравитационной постоянной, впервые примененном в 1880 г., используются обычные чашечные весы большой чувствительности. К одной из чашечек этих весов подвешивается небольшой шар на проволоке длиной в 20—25 м (рис. 80), а на другую — кладутся уравновешивающие

этот шар гири. Затем несколько ниже подвешенного шара помещается большой массивный шар, из-за притяжения которого весы выходят из равновесия. Для восстановления равновесия весов на другую их чашечку приходится положить добавочную гирию, вес которой, очевидно, должен быть равен взаимной силе притяжения двух шаров. Так как расстояние между центрами двух шаров и массы шаров известны, из формулы (1) может быть определено значение f .

Результаты современных определений гравитационной постоянной в системе CGS дают

$$f = \frac{1}{15 \cdot 10^6}.$$

Принимая среднее значение радиуса Земли $R = 6371$ км и среднее значение ускорения силы земного притяжения $g = 982$ см/сек², из уравнения

$$g = f \frac{M}{R^2}$$

можно определить массу Земли. При принятых значениях g , f и R находим: $M = 5,98 \cdot 10^{27}$ г $\approx 6 \cdot 10^{27}$ г. Зная массу Земли и ее объем, можно вычислить и ее среднюю плотность, которая получается равной 5,52.

§ 68. Внутреннее строение Земли. Сравнение средней плотности Земли, равной 5,52, с плотностью поверхностных слоев земной коры, равной 2,67, показывает, что плотность Земли должна увеличиваться с глубиной. На увеличение плотности Земли по направлению к ее центру указывают также как теоретические соображения (например, основанные на величине сжатия Земли), так и наблюдения над скоростью распространения сейсмических колебаний (колебаний, возникающих при землетрясениях) внутри Земли. Результаты изучения этих скоростей приводят к выводу, что плотность внутри Земли непрерывно возрастает с глубиной.

Долгое время предполагалось, что причину увеличения плотности Земли с глубиной следует видеть в изменении химического состава веществ, из которых состоят земные недра. В настоящее время, однако, считается более правдоподобным, что химический состав Земли не изменяется сколько-нибудь значительно с изменением глубины и что большая плотность вещества, из которого состоит внутренняя часть Земли, объясняется огромным давлением, оказываемым внешними слоями Земли.

Изучение распространения сейсмических колебаний показало также, что большая часть вещества в недрах Земли находится как бы в твердом состоянии. На это указывает то обстоятельство, что сейсмические колебания бывают не только продольные, но и поперечные. Твердое состояние вещества внутри Земли подтверждается также измерениями величины приливов в земной коре. Высота

этих приливов оказалась около 30 см, что составляет приблизительно $\frac{1}{3}$ высоты приливов, происходящих в водной оболочке открытых океанов (т. е. вдали от берегов). Наконец, обнаруженное в конце прошлого столетия перемещение полюсов по поверхности Земли (рис. 81), имеющее основной период около 433 суток, тоже показывает, что Земля внутри тверда¹.

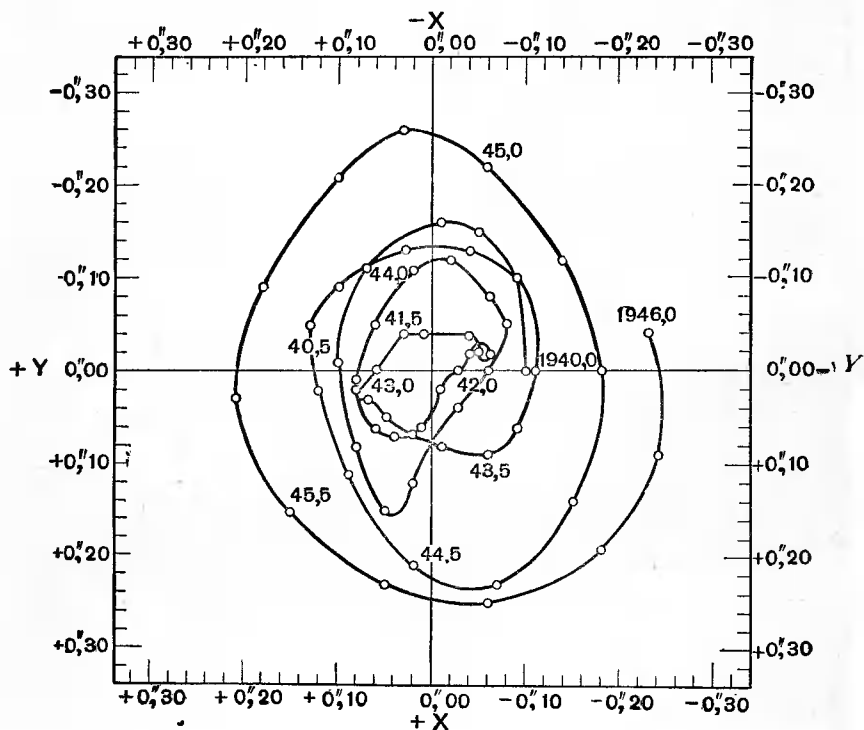


Рис. 81. Перемещение северного полюса по земной поверхности с 1940 по 1946 г.

Общий количественный вывод, получающийся из рассмотрения всех этих явлений, — тот, что Земля в среднем по своей твердости превосходит сталь. Этот результат на первый взгляд противоречит существующим представлениям о высокой температуре, господствующей внутри Земли. Извержения вулканами раскаленной лавы, имеющей температуру, превышающую 1000°C , является уже до-

¹ Как показал еще Эйлер, в случае абсолютной твердости Земли изменения распределения масс внутри Земли и на ее поверхности должны были бы вызвать движение полюсов Земли с периодом в 304 суток. Чем меньше твердость Земли, тем период движения ее полюсов должен быть больше, вплоть до бесконечности.

статочным доказательством этого. С другой стороны, многочисленные наблюдения показали, что, начиная с глубины 30—40 м, температура земной коры непрерывно возрастает с глубиной, в среднем на 3°C на каждые 100 м (геотермический градиент). Изучение химического состава земной коры привело к заключению, что высокая температура внутри Земли в значительной степени поддерживается за счет распада радиоактивных веществ, содержащихся, по-видимому, главным образом в верхних слоях Земли. При учете этого обстоятельства следует предполагать, что температура даже в центре Земли не превышает 2000°C . Так как и такая температура достаточно велика для того, чтобы любое вещество привести не только в жидкое, но и в газообразное состояние, твердое состояние вещества внутри Земли приходится объяснить тем огромным давлением, которое там господствует и влияние которого на агрегатное состояние веществ до настоящего времени еще не изучено лабораторными способами.

Учитывая всю совокупность наших знаний о внутреннем строении Земли, наиболее законным представляется вывод, что внутри Земли различаются следующие слои:

1. Наружный слой (земная кора), имеющий сложную структуру и состоящий в основном из осадочных пород, гранита и базальта.

2. Мантия, или оболочка, Земли, простирающаяся на глубину 2900 км и обладающая свойствами твердого тела, так как внутри нее распространяются поперечные колебания.

3. Ядро Земли, внешняя часть которого в отношении поперечных колебаний ведет себя, как жидкое тело. Внутренняя часть ядра по новейшим исследованиям, начиная с глубины 5000 км, пропускает поперечные колебания, т. е. обладает свойствами твердого тела.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ И ОСНОВЫ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ

§ 69. **Открытие Ньютоном закона всемирного тяготения.** Хотя открытие Кеплером трех законов движения планет (см. § 47) и создало прочный фундамент системы мира Коперника, оставалась неясной причина, вследствие которой планеты движутся вокруг Солнца по замкнутым орбитам, не удаляясь от него прочь. Первая попытка установить эту причину была сделана самим Кеплером, который пытался объяснить движение планет силой, исходящей от Солнца и непрерывно «подталкивающей» планеты в том же направлении, в котором Солнце вращается вокруг своей оси. Позднее аналогичные попытки были сделаны и другими учеными, идеи которых, будучи довольно близкими к истине, были лишены строго научного обоснования. Такое обоснование было дано великим английским ученым Исааком Ньютоном, опубликовавшим в 1687 г. свое знаменитое сочинение «Математические начала натуральной философии» (*Phylosophiae Naturalis Principia Mathematica*), называемое обычно сокращенно — «Начала». Это сочинение явилось тем фундаментом, на котором была создана классическая теоретическая механика, и тот из ее разделов, который трактует вопросы теории движения небесных тел, и называется небесной механикой.

В третьей книге «Начал» была сформулирована теорема: «Силы, которыми главные планеты постоянно отклоняются от прямолинейного движения и удерживаются на своих орбитах, направлены к Солнцу и обратно пропорциональны квадратам расстояния от его центра». Справедливость этой теоремы была доказана Ньютоном строго математически на основании трех законов Кеплера. Однако, помимо доказательства этой теоремы, Ньютон поставил перед собой другую, значительно более общую задачу — показать, что природа силы, удерживающей планеты на их орбитах, тождественна с природой действующей на земной поверхности силы тяжести, что дало бы ему право утверждать о существовании силы взаимного притяжения между всеми существующими телами.

Окончательная формулировка открытого Ньютоном «закона всемирного тяготения» дана в § 71.

Для того чтобы доказать тождественность силы земного притяжения с силой, удерживающей планеты на их орбитах, Ньютон

обратился к изучению движений Луны, справедливо считая, что на Луну при ее движении вокруг Земли должна действовать аналогичная сила. Но если это действительно так, то центростремительное ускорение орбитального движения Луны должно быть в $60^2 = 3600$ раз меньше ускорения силы тяжести, так как Луна отстоит от центра Земли в среднем на расстоянии, приблизительно равном 60 земным радиусам.

Обозначая через g ускорение силы тяжести на земной поверхности и через ω — центростремительное ускорение орбитального движения Луны, имеем: $\frac{\omega}{g} =$

$$= \frac{1}{60^2}, \text{ откуда следует, что } \omega = \frac{981}{3600} \text{ см/сек}^2 = 0,27 \text{ см/сек}^2.^1$$

Однако центростремительное ускорение Луны можно вычислить иначе, пользуясь формулой (которая уже была известна во времена Ньютона) теоретической механики $\omega = \omega^2 R$, где ω — угловая скорость движения Луны по ее орбите, а R — радиус лунной орбиты. Принимая приближенно $R = 60 \cdot 6370$ км, а период обращения Луны вокруг Земли равным 27,3 средних суток, получаем:

$$\omega = \omega^2 R = \left(\frac{2\pi}{27,3 \cdot 86400} \right)^2 \cdot 60 \times \\ \times 6370 \cdot 10^5 \text{ см/сек}^2 = 0,27 \text{ см/сек}^2.$$



Исаак Ньютон
(1643—1727)

Так как этот результат оказался тождественным с результатом, полученным выше, Ньютон увидел в нем доказательство тождественности силы, удерживающей Луну на ее орбите, с силой, заставляющей тела падать на земную поверхность, т. е. с силой тяжести. Отсюда он сделал общий вывод о том, что сила тяжести тождественна с силой взаимного притяжения, действующей между всеми телами Вселенной.

Несмотря на строгое математическое обоснование Ньютоном закона всемирного тяготения, этот закон получил общее признание лишь около середины XVIII в., после чего началось быстрое и разностороннее развитие небесной механики, в первую очередь — в трудах великих математиков (Эйлера, Лапласа и др.).

¹ Здесь и в дальнейшем для простоты расчетов принимается, что Луна движется вокруг Земли по круговой орбите.

§ 70. Вывод закона всемирного тяготения из законов Кеплера. Задача, поставленная и решенная Ньютоном, может быть сформулирована так: найти аналитическое выражение силы, под действием которой планета движется вокруг Солнца по законам Кеплера.

По первому закону Кеплера орбитой планеты является эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Выберем полярную систему координат так, чтобы ее плоскостью являлась плоскость эллиптической орбиты планеты, чтобы ее полюс находился в том из фокусов эллипса, в котором находится Солнце, и чтобы полярная ось была направлена вдоль большой оси эллипса. Тогда первый закон Кеплера может быть аналитически выражен формулой:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \varphi}, \quad (1)$$

где r — полярный радиус, φ — полярный угол, e — эксцентриситет эллипса и p — его параметр.

Второй закон Кеплера (закон площадей) может быть выражен формулой:

$$r^2 \frac{d\varphi}{dt} = c, \quad (2)$$

так как из механики известно, что секториальная скорость (численно равная площади, описываемой полярным радиусом движущейся точки в единицу времени) равна $\frac{r^2}{2} \cdot \frac{d\varphi}{dt}$ и, следовательно, постоянная c в формуле (2) представляет собой удвоенную секториальную скорость, постоянную для данной планеты.

Третий закон Кеплера может быть выражен формулой:

$$\frac{a^3}{P^2} = C, \quad (3)$$

где a — большая полуось эллипса и P — период обращения планеты вокруг Солнца, C — общая постоянная для всех планет.

Напишем дифференциальное уравнение, показывающее, что приращение кинетической энергии равно работе силы:

$$d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = F dr, \quad (4)$$

где v — линейная скорость планеты, m — ее масса, F — сила, действующая на планету по направлению к Солнцу.

Квадрат скорости в полярных координатах, как известно, выражается формулой $v^2 = \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + r^2 \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2$, вследствие чего дифференциальное уравнение (4) может быть представлено в виде

$$\frac{m}{2} \cdot \frac{d}{d\varphi} \left[\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + r^2 \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \right] = F \frac{dr}{d\varphi}.$$

Но из формулы (2) следует, что $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{c}{r^2}$ и $\frac{dr}{dt} = \frac{dr}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = -c \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{1}{r} \right)$, откуда находим:

$$\frac{mc^2}{2} \cdot \frac{d}{d\varphi} \left\{ \left[\frac{d}{d\varphi} \left(\frac{1}{r} \right) \right]^2 + \frac{1}{r^2} \right\} = F \frac{dr}{d\varphi}.$$

Произведя дифференцирование в левой части этого уравнения, получаем (после сокращения на $\frac{dr}{d\varphi}$):

$$-\frac{mc^2}{r^2} \left[\frac{d^2}{d\varphi^2} \left(\frac{1}{r} \right) + \frac{1}{r} \right] = F. \quad (5)$$

Из формулы (1) получаем: $\frac{1}{r} = \frac{1}{p} + \frac{e}{p} \cos \varphi$, откуда следует, что $\frac{d^2}{d\varphi^2} \left(\frac{1}{r} \right) = -\frac{e}{p} \cos \varphi$. Вследствие этого равенство (5) можно записать так:

$$-\frac{mc^2}{pr^2} = F. \quad (6)$$

Мы получили выражение силы, действующей на планету. Эта сила притягательная, так как она направлена к началу координат (т. е. к Солнцу), на что указывает знак минус; кроме того, она обратно пропорциональна квадрату расстояния планеты от Солнца.

Введем обозначение:

$$\frac{c^2}{p} = \mu. \quad (7)$$

Тогда вместо формулы (6) получаем:

$$F = -\mu \frac{m}{r^2}. \quad (8)$$

Докажем, что коэффициент μ постоянен для всех планет солнечной системы. Так как площадь эллипса равна πab , то $c = 2 \frac{\pi ab}{P}$ вследствие того, что c — удвоенная секториальная скорость. Но из аналитической геометрии известно, что $p = \frac{b^2}{a}$. Подставляя эти выражения c и p в формулу (7), получаем:

$$\mu = 4\pi^2 \frac{a^3}{T^2} = 4\pi^2 C, \quad (9)$$

откуда видно, что коэффициент μ , входящий в формулу (8), имеет величину, одинаковую для всех планет. Это позволяет утверждать, что сила F , действующая на любую планету, пропорциональна массе планеты и обратно пропорциональна квадрату расстояния планеты от Солнца.

§ 71. Окончательная формула закона всемирного тяготения. По третьему основному закону механики сила действия Солнца на планету равна по величине и противоположна по направлению силе действия планеты на Солнце. Обозначим последнюю силу F' и по аналогии с формулой (8), выведенной в § 70, напомним ее аналитическое выражение:

$$F' = \mu' \frac{M}{r^2}, \quad (1)$$

где M — масса Солнца.

Так как $F = -F'$, то $\mu \frac{m}{r^2} = \mu' \frac{M}{r^2}$. Отсюда следует:

$$\frac{\mu}{M} = \frac{\mu'}{m} = f, \quad (2)$$

где f — величина постоянная. Очевидно, имеем $\mu = fM$, после чего формулу (8) § 70 мы можем переписать в виде

$$F = -f \frac{Mm}{r^2}. \quad (3)$$

Это и есть окончательная формула закона всемирного тяготения. Постоянный коэффициент f называется постоянной тяготения, или гравитационной постоянной. В системе CGS имеем:

$$f = 6,67 \cdot 10^{-8}$$

В астрономии законом всемирного тяготения пользуются, принимая за единицу массы массу Солнца, за единицу расстояния — среднее расстояние Земли от Солнца («астрономическую единицу») и за единицу времени — средние солнечные сутки. При таком выборе единиц постоянную тяготения обозначают k^2 . Имеем:

$$F = -k^2 \frac{Mm}{r^2}, \quad (4)$$

где $k = 0,017202099 \left(\text{приблизительно } \frac{1}{58} \right)$ называется «гауссовой постоянной».

После того как Ньютон, основываясь на исследовании движения Луны вокруг Земли, отождествил силу тяготения с силой тяжести (§ 69), он дал следующую формулировку закона всемирного тяготения: *каждые две материальные частицы взаимно притягиваются с силой, пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.*

При такой формулировке закона всемирного тяготения в формулах (3) и (4) M и m означают массы двух материальных частиц, а r — расстояние между ними.

Таким образом, сила тяготения действует не только между небесными телами, но и вообще между всеми материальными части-

цами. Все окружающие нас предметы притягивают друг друга, но силы их взаимного притяжения настолько ничтожны, что могут быть обнаружены только при постановке очень точных опытов (см. § 67).

§ 72. Вывод первого и второго законов Кеплера из закона всемирного тяготения. Открыв закон всемирного тяготения на основе трех законов Кеплера, Ньютон решил и обратную задачу: он вывел законы Кеплера из закона всемирного тяготения. При этом он получил первый закон Кеплера (а отчасти — и второй закон) в более общем виде, а третий закон — в более точной форме, чем эти законы были получены эмпирическим путем самим Кеплером. При решении такой обратной задачи Ньютон не принимал во внимание силы, возникающие в результате взаимного притяжения планет, и рассматривал так называемую задачу двух тел, т. е. движение планеты под действием притяжения только Солнца.

Составим дифференциальные уравнения движения какой-либо планеты относительно Солнца, считая его неподвижным. Пусть M — масса Солнца, m — масса планеты и r — расстояние между центрами Солнца и планеты. Очевидно, Солнце притягивает планету с силой $-k^2 \frac{Mm}{r^2}$, сообщаящей планете ускорение $-k^2 \frac{M}{r^2}$; планета в свою очередь притягивает Солнце с силой $k^2 \frac{Mm}{r^2}$, сообщаящей

Солнцу ускорение $k^2 \frac{m}{r^2}$. В соответствии с известным положением механики для получения ускорения планеты относительно Солнца (а не относительно центра инерции системы Солнце—планета) следует сложить ускорение, испытываемое планетой, с ускорением, испытываемым Солнцем, взятым с обратным знаком. Следовательно, ускорение планеты относительно Солнца будет:

$$-k^2 \frac{M}{r^2} - k^2 \frac{m}{r^2} = -\frac{k^2 (M + m)}{r^2}.$$

Приняв за начало пространственной прямоугольной системы координат центр Солнца и взяв проекции относительного ускорения планеты на три координатные оси, получаем систему трех дифференциальных уравнений второго порядка относительного движения планеты:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\mu \frac{x}{r^3}; \quad \frac{d^2y}{dt^2} = -\mu \frac{y}{r^3}; \quad \frac{d^2z}{dt^2} = -\mu \frac{z}{r^3}, \quad (1)$$

где $\mu = k^2 (M + m)$.

Умножим первое из уравнений (1) на $-y$, второе — на x и сложим их. Получим $x \frac{d^2y}{dt^2} - y \frac{d^2x}{dt^2} = 0$, или $d \left(x \frac{dy}{dt} - y \frac{dx}{dt} \right) = 0$. Аналогично получаем: $d \left(z \frac{dx}{dt} - x \frac{dz}{dt} \right) = 0$ и $d \left(y \frac{dz}{dt} - z \frac{dy}{dt} \right) = 0$.

Интегрируя три последние дифференциальные уравнения, находим:

$$x \frac{dy}{dt} - y \frac{dx}{dt} = C; \quad z \frac{dx}{dt} - x \frac{dz}{dt} = B; \quad y \frac{dz}{dt} - z \frac{dy}{dt} = A. \quad (2)$$

Умножив первое из уравнений (2) на z , второе — на y , третье — на x и сложив, получаем:

$$Ax + By + Cz = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) есть уравнение плоскости, проходящей через начало координат. Следовательно, орбита планеты — плоская кривая, расположенная в плоскости, проходящей через центр Солнца.

Выберем новую систему координат так, чтобы плоскость XU совпадала с плоскостью орбиты, а центр Солнца был по-прежнему расположен в начале координат. Тогда вместо трех уравнений (2) получим только одно дифференциальное уравнение:

$$x \frac{dy}{dt} - y \frac{dx}{dt} = C_1.$$

Переходя к полярной системе координат, преобразовываем это уравнение к виду

$$r^2 \frac{d\varphi}{dt} = C_1. \quad (4)$$

Мы получили, таким образом, аналитическое выражение второго закона Кеплера — закона площадей. Постоянная C_1 в правой части уравнения (4) представляет собой удвоенную секториальную скорость планеты, а само уравнение (4), так же как и соответствующее ему уравнение в прямоугольной системе координат, называется интегралом площадей.

Умножим теперь первое из уравнений (1) на $\frac{dx}{dt}$, второе — на $\frac{dy}{dt}$ и сложим почленно полученные произведения:

$$\frac{dx}{dt} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dy}{dt} \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{\mu}{r^3} \left(x \frac{dx}{dt} + y \frac{dy}{dt} \right).$$

Левая часть этого дифференциального уравнения может быть представлена в виде

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dt} \left[\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \right].$$

Кроме того, $x \frac{dx}{dt} + y \frac{dy}{dt} = r \frac{dr}{dt}$, так как $x^2 + y^2 = r^2$.

Отсюда следует:

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \right] = -2 \frac{\mu}{r^2} \cdot \frac{dr}{dt} = 2\mu \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{r} \right).$$

Выражение, стоящее в квадратной скобке в левой части последнего уравнения, представляет собой квадрат скорости, т. е. v^2 ; следовательно: $dv^2 = 2\mu d\left(\frac{1}{r}\right)$.

Интегрируя это дифференциальное уравнение, получаем:

$$v^2 = \frac{2\mu}{r} + C_2. \quad (5)$$

Это уравнение в небесной механике называется интегралом живых сил. Численное значение постоянной интегрирования C_2 , очевидно, определяется начальными условиями: значениями полярного радиуса r_0 и скорости v_0 в момент t_0 .

Но, как об этом уже упоминалось в § 69, $v^2 = \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + r^2 \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2$, или $v^2 = \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \left[\left(\frac{dr}{d\varphi}\right)^2 + r^2\right]$. Подставляем из уравнения (4) значение $\frac{d\varphi}{dr}$

$$v^2 = \frac{C_1^2}{r^4} \left[\left(\frac{dr}{d\varphi} \right)^2 + r^2 \right]. \quad (6)$$

Приравнявая правые части уравнений (5) и (6), получаем:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dr}{d\varphi} \right)^2 + r^2 &= \frac{2\mu r^3}{C_1^2} + \frac{C_2 r^4}{C_1^2}, \\ \frac{dr}{d\varphi} &= \frac{r^2}{C_1} \sqrt{\frac{2\mu}{r} + C_2 - \frac{C_1^2}{r^2}}, \\ d\varphi &= \frac{dr}{\frac{r^2}{C_1} \sqrt{\frac{2\mu}{r} + C_2 - \frac{C_1^2}{r^2}}} = \\ &= \frac{d\left(\frac{C_1}{r} - \frac{\mu}{C_1}\right)}{\sqrt{\frac{\mu^2}{C_1^2} + C_2 - \left(\frac{C_1}{r} - \frac{\mu}{C_1}\right)^2}} = \frac{d \frac{\frac{C_1}{r} - \frac{\mu}{C_1}}{\sqrt{\frac{\mu^2}{C_1^2} + C_2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\frac{C_1}{r} - \frac{\mu}{C_1}}{\sqrt{\frac{\mu^2}{C_1^2} + C_2}} \right)^2}}. \end{aligned}$$

Интегрируя обе части последнего уравнения, находим:

$$\varphi = \arccos \frac{\frac{C_1}{r} - \frac{\mu}{C_1}}{\sqrt{\frac{\mu^2}{C_1^2} + C_2}} + C_3,$$

$$\frac{\frac{C_1}{r} - \frac{\mu}{C_1}}{\sqrt{\frac{\mu^2}{C_1^2} + C_2}} = \cos(\varphi - C_3).$$

Произведя очевидные преобразования, получаем:

$$r = \frac{\frac{C_1^2}{\mu}}{1 + \sqrt{1 + \frac{C_2 C_1^2}{\mu^2} \cdot \cos(\varphi - C_3)}}. \quad (7)$$

Мы получили уравнение кривой второго порядка в полярной системе координат. Эксцентриситет и параметр этой кривой равны:

$$e = \sqrt{1 + \frac{C_2 C_1^2}{\mu^2}}; \quad (8)$$

$$p = \frac{C_1^2}{\mu}. \quad (9)$$

Постоянную интегрирования C_3 обычно обозначают ω . Эта постоянная вообще не равна нулю, так как полярная ось выбиралась произвольно, и лишь в частном случае может совпадать с осью кривой второго порядка.

Произведя соответствующие замены, вместо уравнения (7) получаем:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos(\varphi - \omega)}. \quad (10)$$

Из уравнений (7) и (10) следует, что движение планет вокруг Солнца может происходить по одному из трех конических сечений, т. е. что орбита планеты может быть либо эллиптической, либо параболической, либо гиперболической. Таким образом, выведенный на основе закона всемирного тяготения первый закон Кеплера имеет более общий вид, чем тот, в котором он был получен самим Кеплером.

Из рассмотрения формулы (8) видно, что вид кривой второго порядка, по которой движется планета, зависит от знака постоянной C_2 . Если $C_2 < 0$, то $e < 1$ и кривая (7) — эллипс; при $C_2 = 0$

кривая оказывается параболой, а при $C_2 > 0$ — гиперболой. Но постоянная C_2 входит в выражение (5) квадрата линейной скорости, с которой планета движется по своей орбите. Задаваясь начальными условиями, имеем:

$$C_2 = v_0^2 - \frac{2\mu}{r_0}.$$

Из этой формулы видно, что при $v_0 = \sqrt{\frac{2\mu}{r_0}}$ орбита планеты будет параболической; при $v_0 < \sqrt{\frac{2\mu}{r_0}}$ орбита будет эллиптической и при $v_0 > \sqrt{\frac{2\mu}{r_0}}$ — гиперболической. Таким образом, форма орбиты зависит от величины v_0 , соответствующей одному и тому же расстоянию планеты от Солнца r_0 .

§ 73. Вывод третьего закона Кеплера из закона всемирного тяготения. Если планета движется по эллиптической орбите, постоянная C_1 в соответствии с формулой (4), выведенной в § 72, равная удвоенной секториальной скорости планеты, может быть представлена в виде (см. § 69):

$$C_1 = \frac{2\pi ab}{P}.$$

Но из формулы (9) § 72 следует, что $C_1^2 = p\mu$. Следовательно:

$$\frac{4\pi^2 a^2 b^2}{P^2} = p\mu;$$

а так как $\mu = k^2(M + m)$ и $p = \frac{b^2}{a}$, то $\frac{4\pi^2 a^2 b^2}{P^2} = \frac{k^2(M + m) b^2}{a}$.

Отсюда получаем:

$$\frac{P^2(M + m)}{a^3} = \frac{4\pi^2}{k^2} = \text{const.} \quad (1)$$

Для двух планет с массами m_1 и m_2 , периодами обращения вокруг Солнца P_1 и P_2 и с большими полуосями их орбит a_1 и a_2 имеем:

$$\frac{P_1^2(M + m_1)}{a_1^3} = \frac{P_2^2(M + m_2)}{a_2^3}. \quad (2)$$

Формула (2) дает точное выражение третьего закона Кеплера. Если в этой формуле пренебречь массами планет m_1 и m_2 , малыми по сравнению с массой Солнца M , получаем $\frac{P_1^2}{P_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$, т. е. формулу третьего закона Кеплера, полученную им на основе наблюдений.

§ 74. **Определение масс Солнца, Луны и планет.** Пользуясь формулой (1), выведенной в § 73, можно найти отношение массы планеты, имеющей спутника, к массе Солнца. Обозначим массы Солнца, планеты и ее спутника через M , m и m_1 ; сидерические периоды обращения планеты вокруг Солнца и спутника вокруг планеты обозначим через P и P_1 . Тогда по формуле (1) § 73 имеем:

$$\frac{P^2 (M + m)}{a^2} = \frac{4\pi^2}{k^2} \quad \text{и} \quad \frac{P_1^2 (m + m_1)}{a_1^3} = \frac{4\pi^2}{k^2}.$$

Приравнявая левые части этих равенств друг другу и произведя очевидные преобразования, получаем:

$$\frac{M + m}{m + m_1} = \left(\frac{P_1}{P}\right)^2 \cdot \left(\frac{a}{a_1}\right)^3. \quad (3)$$

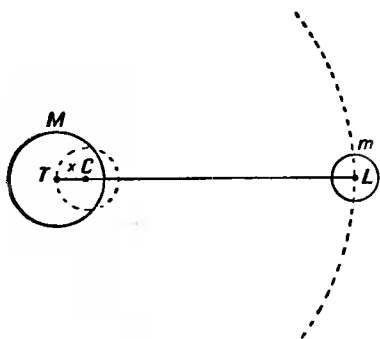


Рис. 82. Общий центр тяжести Земли и Луны

Так как обычно масса спутника бывает очень мала по сравнению с массой планеты, которая в свою очередь мала по сравнению с массой Солнца, можно с достаточной степенью точности написать:

$$\frac{M}{m} = \left(\frac{P_1}{P}\right)^2 \cdot \left(\frac{a}{a_1}\right)^3. \quad (4)$$

По формуле (4) может быть определено отношение масс планет, имеющих спутников, к массе Солнца. Однако Земля в данном случае представляет исключение, так как масса ее спутника — Луны — всего лишь в 80 раз (приблизительно) меньше массы планеты — Земли. Вследствие этого для сравнения массы Земли с массой Солнца необходимо предварительно определить массу Луны.

Под действием взаимного притяжения Земля и Луна движутся по эллиптическим орбитам вокруг их общего центра тяжести C (рис. 82). Обозначим расстояние центра Земли T от точки C через x и массы Земли и Луны через m и m_1 . Тогда получим:

$$xm = (r - x) m_1,$$

где r — расстояние между центрами Земли и Луны. Для определения величины x производят точные измерения долготы Солнца, которая изменяется не только из-за движения Земли вокруг Солнца, но также из-за ее движения вокруг центра тяжести системы Земля—Луна. Оказалось, что x в среднем составляет 4635 км (меньше радиуса Земли), т. е. около $1/82,5$ среднего расстояния между центрами Земли и Луны. Отсюда следует, что масса Луны равна $1/81,5$ массы Земли, т. е. $m = 81,5 m_1$.

Для того чтобы выразить массу Солнца M в массах Земли m , воспользуемся формулой (3). Примем $m = 1$, $P = 365^{\text{д}}$, 256 , $P_1 = 27^{\text{д}}$, 32 , $a = 149,5 \cdot 10^6$ км, $a_1 = 384,4 \cdot 10^3$ км. После подстановки этих величин в формулу (3) получаем $M = 333 \cdot 10^3$, т. е. масса Солнца в 333 000 раз больше массы Земли и, следовательно, равна приблизительно $2 \cdot 10^{33}$ г (см. § 141).

§ 75. **Элементы планетных орбит.** Выше было доказано (§ 72), что орбита планеты в задаче двух тел может быть либо эллипсом, либо параболой, либо гиперболой. Для того чтобы было известно расположение орбиты относительно какой-либо системы координат, необходимо знать: а) размеры и форму орбиты; б) положение плоскости, в которой она расположена; в) положение орбиты в этой плоскости. Помимо этого, для знания движения планеты по ее орбите необходимо задание некоторого параметра, характеризующего положение планеты на ее орбите в определенный момент времени.

Построим пространственную систему прямоугольных координат с началом координат в центре Солнца O и с плоскостью xOy , совпадающей с плоскостью эклиптики какой-либо эпохи¹ (рис. 83). Ось Ox направим в точку весеннего равноденствия, а ось Oy — в точку с долготой, равной 90° . Ось Oz окажется направленной в северный полюс эклиптики. Линия пересечения плоскости орбиты планеты с плоскостью эклиптики $\Omega\varpi$ называется линией узлов, а точки пересечения плоскости орбиты с эклиптикой называются узлами орбиты: точка Ω — восходящим узлом и точка ϖ — нисходящим узлом. Как видно из рисунка 83, в точке Ω планета переходит из области отрицательных широт в область положительных.

Для определения положения плоскости орбиты достаточно знать угол i между этой плоскостью и плоскостью эклиптики, а также угол Ω между осью Ox и линией узлов. Угол i называется наклоном орбиты и отсчитывается от 0 до 180° .² Угол Ω называется долготой восходящего узла; он отсчитывается от 0 до 360° в направ-

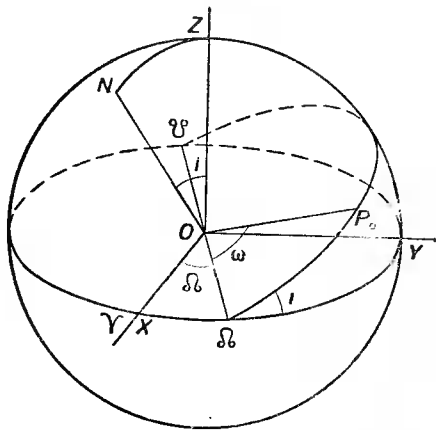


Рис. 83. Элементы орбиты планеты

¹ Эпохой в астрономии называется определенный момент времени, для которого известны значения некоторых переменных параметров.

² Угол i измеряется также дугой ZN между северным полюсом эклиптики и полюсом орбиты N , из которого движение планеты кажется прямым (т. е. происходящим против хода часовой стрелки).

влении увеличения долгот (т. е. против движения часовой стрелки, если смотреть со стороны северного полюса эклиптики).

Проведем в плоскости орбиты линию OP_0 , направленную в перигелий орбиты. Угол между этой линией и линией узлов определяет положение орбиты в ее плоскости. Он обозначается буквой ω и называется расстоянием перигелия от узла. Отсчитывается угол ω от 0 до 360° в направлении движения планеты.

Углы i , Ω и ω называются элементами орбиты планеты, определяющими положение плоскости орбиты и положение орбиты в этой плоскости. Еще два элемента орбиты — большая полуось a и эксцентриситет e — определяют размеры и форму орбиты. Если орбита параболическая, вместо двух элементов a и e форма и размеры орбиты (в данном случае, как и при гиперболической орбите под размерами орбиты следует понимать перигелийное расстояние) определяются одним элементом — параметром p . Для определения положения планеты на ее орбите необходимо знать шестой элемент (в случае параболической орбиты — пятый) T — момент прохождения планеты через перигелий.

Часто вместо элемента ω , т. е. расстояния перигелия от узла, берут элемент $\pi = \Omega + \omega$, называемый долготой перигелия. Часто также вместо элемента T пользуются углом между направлением на перигелий и радиусом-вектором, направленным к планете, в заданный момент времени.

В заключение следует указать, что все планеты движутся только по эллиптическим орбитам. Гиперболические и (условно) параболические орбиты бывают у комет и метеорных тел (см. главу IX).

§ 76. Эллиптическое движение. Рассмотрим эллиптическое движение планеты вокруг Солнца. Примем обычные обозначения: a и b — большая и малая полуоси эллиптической орбиты, e — эксцентриситет орбиты. Поместим начало плоской прямоугольной системы координат в центре Солнца S и направим ось OX вдоль большой полуоси эллипса по направлению к перигелию (рис. 84). Уравнение эллипса будет:

$$\frac{(x + ae)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

Пусть планета находится в точке орбиты P . Опишем вокруг центра эллипса окружность радиусом a и проведем через точку P линию, параллельную оси Sy . Эта линия пересечет окружность в точке N .

При рассмотрении движения планеты по эллиптической орбите обычно пользуются двумя углами v и E (см. рис. 84). Первый из этих углов называется истинной аномалией планеты и представляет собой ее полярный угол. Угол E называется эксцентрической аномалией планеты и представляет собой угол с вершиной в центре эллипса и со сторонами OP_0 и ON . При движении планеты по ее орбите оба эти угла изменяются неравномерно от 0 до 360° .

Рассмотрим еще величину n , называемую средним (суточным) угловым движением планеты по орбите. Если P есть сидерический период обращения планеты вокруг Солнца, то, очевидно:

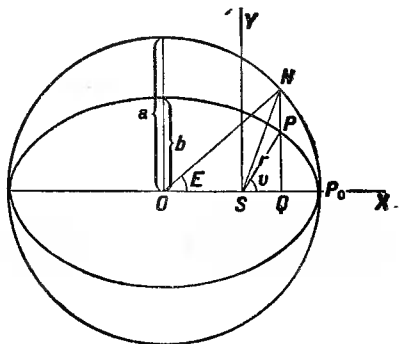
$$n = \frac{360^\circ}{P} = \frac{2\pi}{P},$$

где P выражено в сутках.

$$M = n(t - T).$$

Для вычисления значения угла M в момент t можно пользоваться и не моментом T прохождения планеты перигелия, а другой постоянной. Действительно, для некоторого момента t_0 имеем:

$$M_0 = n(t_0 - T).$$

$$M = M_0 + n(t - t_0), \quad (1)$$


Таким образом, для определения M достаточно знать значение M_0 , соответствующее моменту t_0 . Этот момент называется эпохой средней аномалии, а угол M_0 — средней аномалией в эпоху t_0 .

$$n^2 = \frac{4\pi^2}{p^2} = \frac{k^2(M+m)}{a^3}.$$
$$n = \frac{k \sqrt{M + m}}{a^{1/2}}$$
$$n = \frac{0^{\circ},985608 \sqrt{M+m}}{a^{3/2}}. \quad (2)$$
$$\left. \begin{aligned} M &= E - e \sin E, \\ r &= a(1 - \cos E), \\ \operatorname{tg} \frac{v}{2} &= \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \cdot \operatorname{tg} \frac{E}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

167

Первая из этих формул, носящая название «уравнение Кеплера», играет особенно важную роль при вычислении элементов орбит и эфемерид планет. Для этой же цели служат две другие формулы (3), а также формулы (1) и (2).

§ 77. Понятие о вычислении орбит и эфемерид. Задача вычисления планетной (эллиптической) орбиты состоит в определении шести ее элементов: i , Ω , ω , a , e и T (или M_0). Это может быть выполнено на основе трех наблюдений планеты, каждое из которых дает две измеренные координаты планеты, обычно экваториальные, т. е. прямое восхождение планеты α и ее склонение δ в три различных момента времени. Знание шести координат планеты дает возможность составить шесть уравнений, связывающих эти координаты с элементами орбиты планеты. Однако получаемая система уравнений оказывается настолько сложной, что для ее решения приходится вводить ряд промежуточных неизвестных. Такими неизвестными являются прямоугольные геоцентрические и гелиоцентрические координаты планеты, а также расстояния планеты от Земли и Солнца. По гелиоцентрическим координатам можно получить значения элементов орбиты планеты.

При вычислении параболической кометной орбиты требуется, как было указано, определить только пять элементов орбиты, что приводит к несколько более простым расчетам.

Под *эфемеридой* планеты (или кометы) в небесной механике подразумевается ряд вычисленных положений планеты на небесной сфере, определяемых чаще всего экваториальными ее координатами — прямым восхождением и склонением.

Для вычисления экваториальных координат планеты необходимо знать:

1) элементы планетной орбиты — i , Ω , ω , a , e и M_0 для эпохи t_0 ;

2) прямоугольные экваториальные геоцентрические координаты Солнца X , Y и Z (эти координаты берутся из «Астрономического ежегодника СССР»);

3) наклон плоскости эклиптики к плоскости небесного экватора ϵ .

Прежде всего можно вычислить вспомогательные величины: q , Q , a , A , b , B , c , C (a , b и c — больше нуля) по следующим формулам:

$$\begin{aligned} q \cdot \sin Q &= \sin i; & b \cdot \cos B &= \cos(Q + \epsilon); \\ q \cdot \cos Q &= \cos i \cdot \cos \Omega; & b \cdot \sin B &= \sin \Omega \cdot \cos \epsilon; \\ a \cdot \sin A &= \cos \Omega; & c \cdot \sin C &= \sin \Omega \cdot \sin \epsilon; \\ a \cdot \cos A &= -\cos i \cdot \sin \Omega; & c \cdot \cos C &= q \cdot \sin(\Omega + \epsilon). \end{aligned}$$

Затем можно вычислить n , M , ϵ , а затем — v и r по формулам (1), (2) и (3), выведенных в § 76. Первое из уравнений (3) § 76 не может быть разрешено непосредственно относительно ϵ ; оно обычно решается методом итерации с использованием таблиц, специально составленных для его решения. В формуле (2) § 76 в подавляющем большинстве случаев можно пренебречь массой планеты m , очень

малой по сравнению с массой Солнца M , а так как последняя масса в гауссовой постоянной k принята за единицу, то формула (2) § 75 принимает вид:

$$n = \frac{0^{\circ}, 985608}{a^{3/2}}.$$

После того как v и r вычислены, переходят к вычислению прямоугольных экваториальных гелиоцентрических координат планеты по формулам:

$$x = ar \sin(A + v + \omega); \quad y = br \sin(B + v + \omega);$$

$$z = cr \sin(C + v + \omega).$$

Складывая x , y и z соответственно с X , Y и Z (т. е. с прямоугольными экваториальными геоцентрическими координатами Солнца), вычисляют прямое восхождение и склонение планеты, а также ее расстояние от Земли Δ по формулам:

$$\Delta \cdot \cos \delta \cdot \cos \alpha = x + X; \quad \Delta \cdot \cos \delta \cdot \sin \alpha = y + Y; \quad \Delta \cdot \sin \delta = z + Z^1,$$

причем Δ получается в астрономических единицах.

В заключение вводят поправку Δt в заданный момент t , для которого были вычислены значения α , δ и Δ планеты, за так называемую планетную аберрацию. Необходимость введения этой поправки, вычисляемой по формуле $\Delta t = 498',5 \cdot \Delta$, объясняется тем, что скорость света не бесконечно велика, вследствие чего полученные для планеты значения α и δ будут наблюдаться с Земли не в момент времени t , для которого они были вычислены, а в момент $t + \Delta t$.

Точность координат планеты, содержащихся в эфемериде, зависит от точности знания элементов орбиты и от точности расчетов. Для того чтобы получить координаты планеты с точностью до $1'$, необходимо производить вычисления с четырехзначными таблицами логарифмов.

§ 78. Понятие о задаче трех тел. В предыдущих параграфах мы исходили из предположения, что планеты движутся вокруг Солнца только под действием притяжения Солнца, и не учитывали их взаимного притяжения. Поэтому из закона всемирного тяготения были теоретическим путем получены законы Кеплера как законы движения планет. Однако в действительности планеты движутся по несравненно более сложным траекториям. И если Кеплер открыл законы движения планет почти в том же виде, в котором они позднее были теоретически получены Ньютоном, то это произошло только потому, что масса Солнца во много раз превышает массы всех планет, вместе взятых, — приблизительно в 750 раз. Вследствие этого

¹ Имеем: $x + X = \xi$, $y + Y = \eta$, $z + Z = \zeta$, где ξ , η , ζ — прямоугольные экваториальные геоцентрические координаты планеты.

любая из планет притягивается к Солнцу во много раз с большей силой, чем всеми остальными планетами, и ее траектория близка к той, по которой она двигалась бы под действием только солнечного притяжения.

Задача, в которой определяется траектория движения планеты под действием притяжения Солнца и одной из других планет, называется задачей трех тел. Она оказалась настолько сложной, что до настоящего времени не решена в общем виде в форме, пригодной для практического применения. Вследствие этого учет действия притяжения так называемой «возмущающей силы» каждой из других планет на движение рассматриваемой планеты производится отдельно при помощи бесконечных сходящихся рядов и связан с чрезвычайно трудоемкими вычислениями.

Рассмотрим вопрос о том, что представляет собой ускорение возмущающей силы третьего тела. Пусть в точке S находится Солнце, в точке P_1 — планета, движением которой мы интересуемся, и в точке P_2 — вторая планета

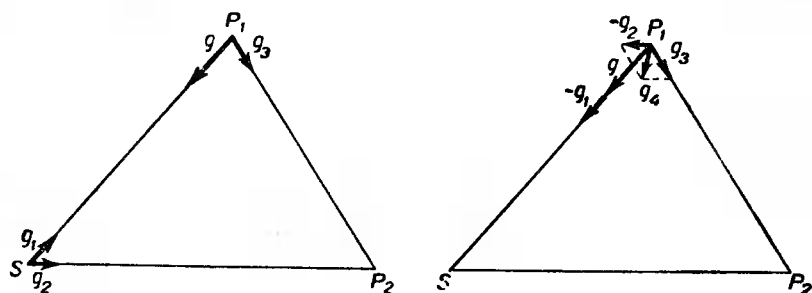


Рис. 85. К задаче трех тел

(рис. 85). Обозначим массы Солнца и двух планет буквами M , m_1 и m_2 . Расстояния между Солнцем и планетами обозначим буквами r_1 и r_2 , а расстояние между двумя планетами буквой r_3 .

Планета P_1 получит два ускорения¹: от Солнца $g = \frac{k^2 M}{r_1^2}$ и от планеты

$g_3 = \frac{K^2 m_2}{r_3^2}$. Солнце тоже получит два ускорения от двух планет: $g_1 = \frac{k^2 m_1}{r_1^2}$

и $g_2 = \frac{K^2 m_2}{r_2^2}$. Если мы (как это уже делалось в § 72) будем считать Солнце не-

подвижным, а планету P_1 движущейся не вокруг общего центра тяжести, а вокруг Солнца, мы должны приложить к планете P_1 ускорения, получаемые Солнцем от обеих планет, взятые с обратными знаками. В результате этого (см. правую часть рис. 85) ускорение, получаемое планетой P_1 по направлению к Солнцу, будет равно $\frac{k^2 (M + m)}{r_1^2}$. Кроме этого ускорения, планета P_1 будет испытывать ускорение g_4 , равное сумме ускорений g_3 и g_2 .

¹ Во всех случаях здесь даются модули ускорений.

сложенных по правилу параллелограмма. Как видно из рисунка, ускорение g_4 , называемое возмущающим ускорением, в общем случае не направлено к возмущающему телу, т. е. к планете P_2 .

Масса Меркурия была определена по возмущениям, производимым этой планетой в движении кометы Энке — Баклунда. Массу Венеры удалось определить по возмущениям, производимым Венерой в движении Луны.

§ 79. Возмущения элементов планетных орбит и вопрос об устойчивости солнечной системы. Как уже говорилось, траектория движения каждой из планет очень сложна. Однако удобно считать, что все планеты движутся по эллиптическим орбитам, но таким, элементы которых изменяются с течением времени под действием возмущающих сил других планет. Изменения элементов планетных орбит называются возмущениями, или неравенствами элементов, орбит. Они делятся на вековые и периодические возмущения.

Вековые возмущения зависят от взаимного расположения планетных орбит, которое в течение чрезвычайно больших периодов времени изменяется очень мало. Вследствие этого они выражаются в изменении элементов орбит, происходящих в одном и том же направлении приблизительно пропорционально времени.

Периодические возмущения зависят от относительного положения самих планет. Этим и объясняется их периодичность, так как одинаковое расположение планет повторяется через определенные промежутки времени. Существуют они в изменении элементов орбит, происходящих попеременно то в одном, то в противоположном направлении.

В настоящее время у орбит больших планет их элементы i и e невелики. Можно ли, однако, предполагать, что эти элементы и в дальнейшем останутся столь же малыми? Этот вопрос тесно связан с вопросом об устойчивости солнечной системы. Действительно, если бы, например, эксцентриситеты орбит e были подвержены вековым возмущениям, то при непрерывном их увеличении перигелийные расстояния планет непрерывно уменьшались бы, что привело бы к совершенно иному расположению орбит больших планет.

Теоретические исследования этого вопроса показали, что изменения больших полуосей, эксцентриситетов и наклонов орбит больших планет заключены в очень тесных границах. Вследствие этого можно заключить, что указанные элементы орбит подвержены только периодическим возмущениям, имеющим разнообразные амплитуды колебаний и периоды. С другой стороны, было доказано, что долготы узлов Ω и угловые расстояния перигелиев от узлов ω имеют как периодические, так и вековые возмущения. Однако непрерывное увеличение (или уменьшение) этих элементов не может повлиять на устойчивость солнечной системы.

Нет никаких оснований для предположений о значительных изменениях в строении солнечной системы в течение многих миллионов лет.

§ 80. Открытия Нептуна и Плутона. В 1781 г. Вильям Гершель, наблюдая в телескоп звездное небо, открыл новую планету, которая была названа Ураном. Оказалось, что она находится от Солнца приблизительно вдвое дальше, чем Сатурн. После вычисления элементов орбиты Урана и составления таблиц его движения удалось установить, что некоторые астрономы наблюдали Уран и до 1781 г., но принимали его за звезду. Петербургский академик Лексель,

используя все наблюдения Урана, стал определять его орбиту. При этом он обнаружил неправильности в движении Урана, которые не могли быть объяснены возмущениями со стороны известных тогда планет. Дальнейшие наблюдения над Ураном еще более определенно подтвердили этот вывод. К 1845 г. отклонения в движении Урана достигли $2'$, что во много раз превосходило точность наблюдений. Молодой французский астроном Леверье, исходя из предположения, что отклонение в движении Урана производится притягательным действием новой, еще неизвестной планеты, находящейся за Ураном, поставил себе задачей определить ее орбиту. При этом задачу по определению элементов орбиты неизвестной планеты он постарался упростить.

Еще около середины XVIII в. в отношении чисел, выражающих средние относительные расположения планет от Солнца, была замечена закономерность, известная под названием правила Тициуса и Боде. Правило это заключается в следующем: берется ряд чисел 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96 и к каждому из них прибавляется по 4; полученные числа 4, 7, 10, 16, 28, 52, 100 достаточно близко выражают средние расстояния от Солнца до планет (от Меркурия до Сатурна), если принять среднее расстояние от Земли до Солнца за 10. Когда был открыт Уран, то и его расстояние от Солнца приблизительно укладывалось в тот же ряд. Не было только планеты, соответствующей числу 28, но на рубеже XIX в. и в этой области была найдена сначала одна малая планета, которой дали название Церера, а в последующие годы и другие малые планеты. Леверье, пользуясь правилом Тициуса и Боде, принял за большую полуось для неизвестной планеты число 38,8, чем значительно упростил вычисления.

Из наблюдений Урана было известно, что эклиптические широты его почти не испытывали возмущений. Это значило, что наклонение i орбиты неизвестной планеты весьма мало. Леверье для простоты предположил, что $i = 0$. Эксцентриситет орбиты неизвестной планеты можно было считать одного порядка с эксцентриситетом Юпитера. Все эти упрощения облегчили возможность решить очень сложную задачу: по отклонениям Урана от предвычисленных для него положений найти величины, характеризующие орбиту неизвестной планеты. Результаты своих вычислений Леверье сообщил 18 сентября 1846 г. берлинскому астроному Галле и просил его поискать новую планету. Дело в том, что Галле имел звездные карты, содержащие слабые звезды. Галле очень скоро обнаружил на небе звезду 8-й величины, которой не было на карте. На следующий вечер эта звездочка переместилась относительно ближайших к ней звезд; при сильном увеличении у нее даже был виден маленький диск. Это, очевидно, и была новая искомая планета. Ее положение на небе отличалось от теоретически указанного Леверье всего лишь на $52'$.

Около того же времени молодой английский астроном Адамс независимо от Леверье вычислил элементы орбиты новой планеты

и, окончив вычисления даже раньше, чем Леверье, теоретически указал ее место на небе. Однако английские астрономы не позаботились вовремя сделать соответствующие наблюдения. Вновь открытой планете дали название Нептун. По дальнейшим наблюдениям элементы ее орбиты были уточнены. Большая полуось оказалась равной почти 30 расстояниям Земли от Солнца, т. е. значительно отличалась по своему значению от того, которое она должна была иметь по правилу Тициуса и Боде. Но принятое Леверье на основании этого правила значение большой полуоси орбиты не повлияло заметно на произведенное им определение положения планеты на небе.

Открытие Нептуна явилось величайшим триумфом науки и опровержением идеалистических рассуждений, оспаривающих возможность познания мира и его закономерностей. Энгельс, критикуя положения Канта и других идеалистов о непознаваемости мира, между прочим, писал: «Солнечная система Коперника в течение трехсот лет оставалась гипотезой, в высшей степени вероятной, но все-таки гипотезой. Когда же Леверье, на основании данных этой системы, не только доказал, что должна существовать еще одна, неизвестная до тех пор, планета, но и определил посредством вычисления место, занимаемое ею в небесных пространствах, и когда после этого Галле действительно нашел эту планету, система Коперника была доказана».

Последняя известная нам планета солнечной системы, Плутон, была открыта в январе 1930 г.

Еще в 1915 г. Персиваль Ловелл решил задачу об орбите новой планеты за Нептуном, которую назвал планетой X. Но в поисках планеты X Ловелл основывался на остающихся необъяснимыми неправильностях в движении Урана, а не Нептуна, как можно было бы ожидать. Дело в том, что со времени первых его наблюдений Нептун не успел еще закончить даже одного полного обращения вокруг Солнца. Ловелл сравнил наблюдения положений Урана с составленными ранее точными таблицами движения этой планеты и нашел величины отклонения, которые лишь немного превосходили возможные ошибки наблюдений. В результате очень сложных вычислений, для осуществления которых было создано специальное вычислительное бюро, вероятнейшие элементы орбиты планеты X были в конце концов вычислены. В 1916 г. Ловелл умер, не успев предпринять поисков новой планеты.

Планета была открыта через 14 лет после смерти Ловелла. Оказалось, однако, что ее элементы сильно отличаются от элементов планеты X. Это видно из приведенной таблицы:

Новооткрытая планета	Планета X Ловелла
a 39,51	43,0
e 0,249	0,202
i $17^{\circ},1$	10°
T 249 лет	282 года

Новая планета получила имя Плутона (бога подземного царства и вообще мрака) и астрономический знак ♇, изображающий инициалы Персиваля Ловелла (PL).

встречу видимому годичному движению Солнца на $50'',2$ в год, так что совершают полный оборот в 26000 лет.

Солнце расположено в плоскости эклиптики, составляющей угол приблизительно в $23^{\circ},5$ с плоскостью экватора. Луна движется вокруг Земли в плоскости, близкой к плоскости эклиптики (под углом всего около 5°). И Луна и Солнце притягивают сильнее ту часть упомянутого кольца, которая к ним ближе. Вследствие этой разности притяжений земной сфероид стремится повернуться так, чтобы земной экватор совпал с плоскостью земной и лунной орбит. В результате этого северный конец земной оси будет описывать конус, как это происходит в подобном случае с гироскопом, каким и является вращающаяся Земля. В самом деле, если сложить два вращения: вокруг оси Земли и вокруг оси, перпендикулярной к плоскости чертежа и проходящей через точку O , то сложение этих двух вращений даст новое вращение, под действием которого ось Земли будет описывать в пространстве коническую поверхность (рис. 87).

174

ваемую *лунно-солнечную прецессию*. Точки равноденствий движутся попятным движением, т. е. навстречу «истинному» Солнцу. Следовательно, равноденствия должны случаться все раньше и раньше, и промежуток времени между последовательными прохождениями центра Солнца через точку весеннего равноденствия, т. е. тропический год, должен быть короче звездного года (периода обращения Земли вокруг Солнца).

Но все явление в действительности происходит гораздо сложнее. Прецессионные силы со стороны Солнца и Луны меняются по величине: они достигают наибольшей величины, когда склонения Солнца и Луны бывают по абсолютному значению наибольшими; когда же оба светила находятся в плоскости экватора (склонение равно 0°), то прецессионные силы обращаются в нуль. В результате этого к равномерному движению $50'',2$ в год присоединяется ряд колебаний гораздо более коротких периодов. Их называют общим термином — *нутации*.

Наибольшая из нутаций имеет период приблизительно в $18\frac{2}{3}$ года, т. е. равный периоду обращения лунных узлов, и достигает в максимуме $9'',2$ (в ту или другую сторону).

Так как вследствие вековых возмущений наклонение эклиптики к экватору и эксцентриситет земной орбиты медленно изменяют свою величину, то получается также и прогрессивное изменение средней величины прецессии.

Так как вследствие прецессии земная ось описывает конус, полюсы мира описывают в тот же период (26 000 лет) малые круги среди звезд вокруг полюсов эклиптики на расстоянии около $23^\circ,5$ от них. Северный полюс эклиптики находится около звезды ζ созвездия Дракона, а северный полюс мира — вблизи Полярной звезды (α Малой Медведицы); 4000 лет назад он был вблизи звезды α Дракона, а через 12 000 лет он приблизится к Веге (α Лиры) (рис. 87).

§ 82. Приливы и отливы. Наблюдения у берегов океанов показали существование периодических поднятий и опусканий уровня воды в океанах. Они происходят в таком порядке: приблизительно через каждые 12^h25^m вода около берега начинает прибывать. Такое поднятие воды продолжается около 6^h13^m . Это и есть *прилив*. Затем, достигнув некоторого максимума высоты, вода начинает постепенно спадать — наступает *отлив*. Явление отлива в среднем

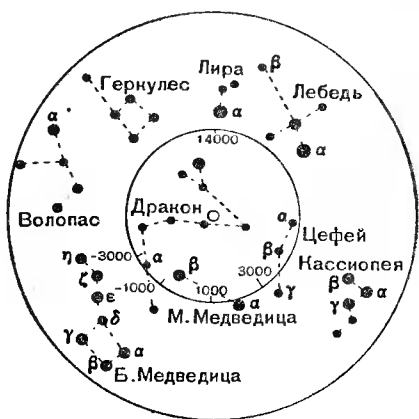


Рис. 87. Перемещение северного полюса мира среди созвездий

тоже продолжается около $6^{\text{ч}}13^{\text{м}}$. Постепенно вода достигает минимального уровня. Затем все явления повторяются в том же порядке.

В течение суток, точнее говоря, в течение $24^{\text{ч}} 50^{\text{м}}$, бывают два прилива и два отлива. Но этот период как раз составляет промежуток времени между двумя последовательными *верхними* (или *нижними*) кульминациями Луны в данном месте земной поверхности. Это показывает, что явление приливов и отливов связано с положением Луны на небе.

Положим, что Земля есть точный шар, весь покрытый океаном. Под действием притяжения Луны все частицы Земли получают некоторое ускорение, направленное к Луне. Чем меньше расстояние частиц от Луны, тем больше получаемое ими ускорение. Ясно, что центр Земли T притягивается Луной с силой, несколько

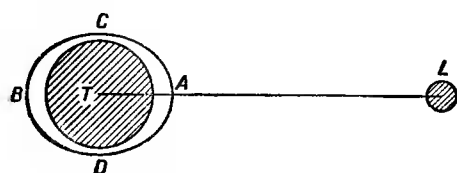


Рис. 88. Объяснение приливов

большой, чем частица воды B , находящаяся на одной прямой с ним и Луной, но дальше от последней (рис. 88). Частица A , находящаяся на той же прямой, но ближе к Луне, притягивается с силой, несколько большей, чем центр Земли. В результате поверхность океана под действием

Луны принимает удлинненную форму, вытянутую по направлению к Луне и в направлении прямо противоположном. Такое происхождение двух приливных горбов. Вследствие вращения Земли эти горбы перемещаются по земным параллелям (приблизительно). Таким образом, движение воды при приливах имеет характер волны с периодом около полусуток.

Обозначим массу Луны через m , а массы частиц воды A и B примем равными единице. Расстояние TL (от центра Земли до центра Луны) назовем буквой r и выразим его в радиусах Земли. Ускорения, приложенные к точкам A , T , B , очевидно, соответственно будут:

$$w_A = f \frac{m}{(r-1)^2}; \quad w_T = f \frac{m}{r^2} \quad w_B = f \frac{m}{(r+1)^2}.$$

Разность притяжений Луной точек A и B выразится формулой:

$$w_A - w_T = fm \left[\frac{1}{(r-1)^2} - \frac{1}{r^2} \right] = fm \left[\frac{2r-1}{r^2(r-1)^2} \right].$$

Единицами по их малости (по сравнению с r и $2r$) можно пренебречь; тогда получаст:

$$w_A - w_T = fm \frac{2r}{r^3} = 2f \frac{m}{r^3}.$$

Эта величина называется *приливообразующим ускорением*. Она, как видим, обратно пропорциональна кубу расстояния от Земли до Луны.

Кроме Луны, и Солнце служит приливообразующим телом, но с меньшим влиянием. Сравним приливообразующие ускорения Луны и Солнца. Расстояние от Земли до Солнца равно почти 23 484 земным радиусам, а масса Солнца в 333 000 раз больше массы Земли, масса Луны составляет $1/81,5$ земной, а расстояние ее от Земли равно 60,3 земного радиуса.

Следовательно, отношение приливообразующих сил Луны и Солнца будет таково:

$$\frac{\frac{1}{81,5} \cdot 23\,484^3}{333\,000 \cdot 60,3^3}.$$

Вычислив это отношение, получим в результате 2,2, т. е. приливообразующая сила Луны почти в 2,2 раза больше приливообразующей силы Солнца.

Направления приливообразующих сил Луны и Солнца непрерывно изменяются вследствие обращения Луны вокруг Земли и Земли вокруг Солнца. Два раза в месяц, когда Луна находится в соединении или в противостоянии с Солнцем, эти направления совпадают; два раза направления эти бывают взаимно перпендикулярны. Вследствие этого два раза в месяц приливы получаются максимальные, что, очевидно, бывает около времени новолуния и полнолуния. Во время первой и последней четверти, наоборот, приливы бывают минимальные, так как лунный прилив соответствует солнечному отливу, а солнечный прилив — лунному отливу. Вообще же в ходе приливов в данном месте наблюдается изменение «амплитуды приливов» в течение месяца.

Луна обращается вокруг Земли по эллиптической орбите и в перигее она бывает на расстоянии около 57 земных радиуса, а в апогее — на расстоянии около 63,7 земного радиуса. Эти изменения в расстоянии должны сказаться и в изменении величины приливообразующей силы Луны: оказывается, что в перигее эта сила примерно на 40% больше, нежели в апогее.

Кроме этих неравенств, существует еще ряд других неравенств, уже второстепенных. Учет всех их является делом весьма сложным. Но ввиду большой практической важности возможно более точного определения моментов наступления приливов и отливов имеется детально разработанная теория приливов, позволяющая делать их прогнозы.

Нужно еще сказать, что дно океанов не везде одинаково глубоко, оно неровно и усеяно кое-где целыми архипелагами подводных островов, а очертания берегов отличаются большим разнообразием. Вследствие этого происходит запаздывание наступления приливов и иногда значительное. Зависит оно от местных условий, которые сильно влияют и на высоту поднятия воды. В открытых океанах амплитуда приливов близка к 1 м. Во внутренних морях, как Балтийское, Черное, приливы очень малы (в несколько санти-

метров), а в океанах, и особенно в узких бухтах, чрезвычайно велики.

В СССР наиболее значительные приливы происходят у Мурманского берега (до 6 м), у Кольского полуострова (до 8 м) и у берегов Тихого океана, особенно в Пенжинской губе Охотского моря (до 13 м). Самые большие приливы на Земле наблюдаются на восточном берегу Канады (до 18 м).

Приливы испытывает также земная атмосфера, что сказывается на изменениях атмосферного давления, выводимых из наблюдений за долгие промежутки времени. Приливные явления обнаружены и в твердом теле Земли, но в значительно меньших размерах, чем в водной оболочке.

§ 83. Движение Луны и лунные возмущения. Изучение орбиты Луны — одна из самых трудных задач небесной механики. Величайшие математики XVIII и XIX вв. уделяли этой задаче очень много внимания. Это, в частности, диктовалось практической необходимостью: в XVIII в. для определения долготы корабля на море употреблялся так называемый метод лунных расстояний, а для его применения были необходимы достаточно точные лунные таблицы.

Дадим краткую характеристику главных лунных неравенств. Луна движется вокруг Земли по приблизительно эллиптической орбите, но при этом:

1) линия узлов обладает почти равномерным попятным движением по эклиптике; полный оборот по эклиптике линия узлов завершает в $18\frac{2}{3}$ года (6793 дня);

2) постоянно действующее небольшое периодическое неравенство уклоняет восходящий узел от среднего положения примерно на $1^{\circ}26'$ в ту и другую сторону;

3) наклонение лунной орбиты к эклиптике колеблется от $5^{\circ}0'$ до $5^{\circ}18'$;

4) эллипс, описываемый Луной, вращается в своей плоскости в прямом направлении почти равномерно; вследствие этого перигей, т. е. наиболее близкая к Земле точка лунной эллиптической орбиты, совершает полный оборот примерно в 9 лет (3233 дня);

5) существует периодическое неравенство, уклоняющее перигей от среднего его положения до $8^{\circ}41'$ в ту и другую сторону.

Главной силой, действующей на Луну, является сила земного притяжения, а силой, возмущающей движение Луны, — сила солнечного притяжения.

Мы видим, что орбита Луны подвержена очень сильным периодическим и вековым неравенствам. Вследствие векового ускорения средняя продолжительность сидерического обращения Луны уменьшается, правда, на незначительную величину, так что Луна уходит вперед на $10''$ за 100 лет. В то же время происходит некоторое замедление вращения Земли, обусловленное приливным трением земных океанов.

§ 84. Движение перигелия Меркурия и теория относительности. Невозмущенная орбита планеты характеризуется постоянной долготой перигелия. Возмущения вызывают медленное вращение планетной орбиты в ее плоскости в прямом направлении, вследствие чего перигелий планеты должен постепенно изменять свою долготу, что и наблюдается в действительности. Однако сравнение наблюдаемого движения перигелия с теоретическим вычислением методами классической небесной механики в случае Меркурия приводит к наличию разницы, которая долгое время оставалась необъяснимой. Еще Леверье установил, что действительное движение перигелия Меркурия приблизительно на $38''$ в столетие превосходит величину перемещения, вызванного возмущениями со стороны других планет. В 1895 г. Ньюком, основываясь на более точных таблицах планетных движений, подтвердил результат Леверье и нашел, что соответствующая величина составляет около $42''$ в столетие. Это отступление от закона тяготения Ньютона получило удов-

летворительное объяснение в 1915 г. на основании общей теории относительности. Эйнштейн показал, что согласно этой теории перемещение перигелия происходит также при невозмущенном движении планеты, и получил для него значение $42''{,}9$ в столетие.

В 1941 г. советский астроном Г. А. Чеботарев произвел переработку наблюдений прохождения Меркурия по диску Солнца. Для движения перигелия Меркурия он получил величину $42''{,}65$, что прекрасно согласуется с результатом, полученным Эйнштейном.

Следует заметить, что перемещение перигелия в соответствии с общей теорией относительности должно иметь место и у других планет, но в гораздо меньшей величине, чем у Меркурия (например, у Венеры $8''{,}6$, у Земли $3''{,}8$, у Марса $2''{,}5$).

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

МЕТОДЫ АСТРОФИЗИКИ

§ 85. Основные методы астрофизики. В астрофизике, т. е. в науке о физической природе небесных тел, пользуются всеми средствами исследования, которые предоставляет современная физика. Многие выводы астрофизики основаны не только на прямом применении физических методов наблюдения, но и на использовании различных физических теорий, с точки зрения которых рассматриваются полученные результаты. Главной особенностью астрофизических исследований, отличающей их от большинства лабораторных физических исследований, является то, что астрофизики лишены возможности изменять физические условия, в которых находятся изучаемые тела. Вторая особенность состоит в том, что астрофизикам в подавляющем большинстве случаев приходится иметь дело с чрезвычайно слабыми источниками света. Ввиду этого те приборы, которые имеют распространение в физических лабораториях, часто оказываются недостаточно чувствительными. Очень многие астрофизические приборы по своей чувствительности представляют предел, до которого дошла современная техника конструкции точных приборов. Как на пример можно указать на термоэлемент — прибор для измерения тепла, излучаемого звездами, который имеет такую чувствительность, что, будучи установлен в фокусе наибольшего телескопа, может отозваться на тепло свечи, горящей на расстоянии нескольких сот километров.

Вместе с тем особенностью астрофизических наблюдений является то, что свет небесных светил, прежде чем он достигнет нашего глаза или приборов, проходит сквозь всю толщу земной атмосферы. Атмосфера различным образом видоизменяет проходящее к нам излучение светил. Она поглощает свет, отчего звезды кажутся менее яркими, чем они есть в действительности, причем это ослабление блеска растет с увеличением зенитного расстояния светил. Лучи различных цветов поглощаются, а также рассеиваются атмосферой неодинаково. Вследствие этого изменяются и цвет светил и распределение энергии в их спектре. Всем известно, например, что Солнце, приближаясь к горизонту, становится все более и более красным. То же самое можно заметить и в отношении звезд.

Для того чтобы уменьшить влияние атмосферы, стремятся строить обсерватории не только подальше от больших городов, над которыми атмосфера загрязнена дымом и пылью, но и располагать их в таких местностях, где перемещения воздушных масс незначительны и где изображения небесных светил в телескопе достаточно устойчивы. При этом, конечно, играет роль и прозрачность воздуха, которая увеличивается с высотой над уровнем моря. Высокие плоскогорья имеют преимущества перед изолированными конусообразными горами, хотя бы и значительной высоты, так как вблизи последних сильнее воздушные течения.

Подводящее большинство сведений, которыми мы располагаем относительно небесных светил, получено путем анализа излучаемого ими света. Отсюда ясно, какую большую роль в астрофизике играет оптика, как геометрическая, так и физическая. Особенно большое значение для астрофизики имеют спектральный анализ и теория строения вещества. Не представляя себе отчетливо основных законов и методов спектрального анализа, нельзя понять, каким образом добыто большинство наиболее интересных и увлекательных данных о строении звезд и звездной Вселенной и о происходящих в ней изменениях.

Основным прибором для астрофизических исследований является телескоп, собирающий свет небесных светил и создающий их изображения в некоторой фокальной плоскости. Изображение небесных светил, получаемое в телескопе, либо рассматривается посредством увеличивающей оптической системы (окуляра), либо фотографируется, или же лучи направляются в более сложные вспомогательные приборы.

Непосредственные наблюдения глазом независимо от того, производятся ли они при помощи телескопа или без него, называются *визуальными*. Изучение небесных светил по получаемым с них фотографиям называется *фотографическим наблюдением*. В последнее время фотографические методы наблюдения все больше вытесняют визуальные.

Телескопы в основном бывают двух типов: рефракторы и рефлекторы.

Рефрактором называется телескоп, основанный на преломлении света: главной его частью является обращенная к объекту линза (объектив), собирающая свет. Преломляясь в объективе, лучи света дают изображение в фокусе объектива.

Рефлекторами называются телескопы, основанные на отражении света: главной их частью является большое вогнутое зеркало. Отразившись от зеркала, лучи собираются в фокусе зеркала, где и создают изображения светил, причем часто, посредством вспомогательных зеркал, изображения получают в стороне от оси телескопа.

Различие между визуальными и фотографическими рефракторами (астрографами) состоит в том, что первые дают наиболее четкие изображения в лучах, сильнее всего действующих на чело-

веческий глаз, т. е. в желтых; объективы астрографа изготовлены таким образом, чтобы давать наиболее резкие изображения в фиолетовых лучах.

Основными методами астрофизики, помимо визуальных наблюдений в телескоп, являются фотография, фотометрия (анализ общего света небесных светил), спектральный анализ и радиофизика. В применении к астрофизике эти методы называют: *астрофотография, астрофотометрия, астроспектроскопия и радиоастрономия*. Для изучения Солнца и для некоторых иных целей применяются особые методы, которые будут описаны в других главах, попутно с изложением тех результатов, которые были получены посредством этих методов.

§ 86. Общие свойства телескопов. Преподавателю астрономии для своей практической работы важно хорошо представлять себе все главнейшие свойства телескопов. Количество света I , собираемого телескопом, приблизительно во столько раз больше количества света, попадающего в человеческий глаз непосредственно, во сколько раз площадь поперечного сечения телескопа больше площади зрачка человеческого глаза, т. е. оно пропорционально квадрату диаметра D объектива телескопа:

$$I = aD^2.$$

При прохождении через объектив свет поглощается в стекле, отражаясь, кроме того, от поверхности линз. Это уменьшает общее количество света, которое в конце концов используется наблюдателем. Подобные потери растут с увеличением толщины объектива и числа составляющих его линз.

В рефлекторах потери света происходят вследствие неполного отражения света от главного зеркала и введения дополнительных малых зеркал на пути лучей.

Важной величиной, характеризующей свойства телескопа, является его светосила. *Светосилой называется отношение диаметра объектива к его фокусному расстоянию ($D : F$)*. Яркость изображения в фокальной плоскости точечных объектов, как, например, звезд, почти не зависит от этой светосилы, а зависит только от диаметра объектива. Но яркость изображения протяженного объекта (например, туманности, кометы или планеты) получается тем больше, чем больше светосила. Яркость изображения пропорциональна квадрату светосилы. Например, обычный светосильный фотографический аппарат ($D : F = 1 : 4,5$) дает на пластинке изображение кометы более яркое, чем гигантский телескоп, у которого светосила в несколько раз меньше. С этим обстоятельством считаются, когда фотографируют небесные светила, и для фотографирования слабо светящихся небесных светил, таких, как кометы и туманности, стремятся применять возможно более светосильные объективы (светосилы от $1 : 5$ до $1 : 0,56$).

Другой важной характеристикой телескопа является его фокусное расстояние. Масштаб изображения, получаемого в фокусе,

пропорционален фокусному расстоянию объектива или зеркала. Как известно из физики, *увеличением называется отношение угла, под которым фокальное изображение объекта видно в окуляр, к углу, под которым объект виден непосредственно*. Увеличение W равно отношению фокусного расстояния F объектива к фокусному расстоянию f окуляра:

$$W = F : f.$$

Таким образом, при одном и том же окуляре увеличение получается тем больше, чем длиннее фокусное расстояние телескопа. Это играет роль и при фотографировании небесных светил. Если, например, мы хотим изучать подробности строения планет, точно измерять расстояния между звездами и т. п., нужно брать длиннофокусные объективы.

Из того же соотношения $W = F : f$ видно, что при данном телескопе с определенным объективом получаемое увеличение зависит от фокусного расстояния окуляра. *Чем короче фокусное расстояние окуляра, тем больше получаемое увеличение*. Телескоп нормального качества дает максимальное полезное увеличение, вдвое превышающее диаметр отверстия телескопа, выраженный в миллиметрах. Например, телескоп школьного типа с объективом диаметром в 80 мм позволяет применять различные увеличения до 160 раз.

Большой помехой при астрономических наблюдениях является влияние атмосферы. Движение воздушных масс между наблюдателем и небесными светилами заставляет изображения светил дрожать, расплываться по краям и меняться в отчетливости. Вследствие этого в хорошую ясную ночь, когда воздух спокоен и изображения отчетливы, можно бывает в небольшой телескоп рассмотреть такие подробности, которые при плохих атмосферных условиях не могут быть видны даже в самый сильный телескоп. В астрономической практике редко применяются увеличения более 500 раз, хотя теоретически наибольшие из существующих телескопов могут давать увеличения, доходящие до нескольких тысяч раз.

Поле зрения телескопа, т. е. размер той площади неба, которая видна в телескоп при данном окуляре, зависит от конструкции окуляра. При одном и том же типе окуляров *поле зрения тем меньше, чем больше увеличение*. При увеличении в 30 раз Луна обычно целиком помещается в поле зрения, хотя ее видно с небольшим числом подробностей. Увеличение в 300 раз показывает Луну с гораздо большим количеством деталей, но в поле зрения телескопа помещается только небольшая часть лунной поверхности.

Если присмотреться внимательно к изображению звезды в телескопе, то можно заметить, что, когда воздух спокоен, изображение звезды, видимое в телескоп, имеет форму очень маленького светлого кружка, окруженного рядом светлых колец. Внутренние кольца ярче, внешние слабее. Это явление обусловлено дифракцией света от краев объектива. *Чем больше диаметр отверстия телескопа и чем больше его светосила, тем меньше дифракционный*

диск и тем ярче изображение звезды. Звезды излучают свет всевозможных длин волн, но если учесть, что на глаз сильнее всего действуют желтые лучи с длиной волны около $5\,500\text{ \AA}$, то мы получим для визуальных наблюдений угловой радиус дифракционного диска звезд в секундах дуги:

$$d = 14'' : D,$$

где D выражено в сантиметрах. Например, для телескопа с объективом в 10 см дифракционный диск звезды $1'',4$, а для метрового рефлектора — $0'',14$. Диаметр дифракционного диска звезды обуславливает так называемую разрешающую силу телескопа.

Разрешающая сила телескопа характеризуется наименьшим угловым расстоянием, при котором две удаленные светящиеся точки видимы с него раздельно, не сливаясь.

Хорошим испытанием качества телескопа является проверка его по тесным двойным звездам и сравнение наблюдаемой разрешающей силы с теоретической.

Проницающая сила телескопа характеризуется предельной звездной величиной звезд, видимых в него в ясную безлунную ночь близ зенита. Эта величина зависит от прозрачности воздуха, совершенства оптики и определяется из наблюдений. Для примера в таблице 5 приводим проницающую и фактическую разрешающую силу телескопов школьного типа и наибольших из существующих телескопов:

Таблица 5

Диаметр объектива	m	d
8 см	12,0	$1'',7$
16 см	13,5	0,9
102 см—наибольший в мире рефрактор	16,8	0,14
500 см— » » » рефлектор	21,0	0,03

Посредством фотографии удастся изучать более слабые звезды, чем те, которые видны визуально в данный телескоп. При помощи наибольших современных рефлекторов можно фотографировать звезды до 23-й звездной величины. Напомним, что невооруженным глазом в безлунную ночь видны звезды до 6-й звездной величины, а в призмный бинокль — до 9-й звездной величины.

Так как телескоп даже при наименьшем увеличении имеет сравнительно небольшое поле зрения, то для облегчения наводки телескопа на светила на нем устанавливается вспомогательный телескоп небольшого размера, дающий малое увеличение, но большое поле зрения. Такой вспомогательный телескоп называется *искателем*. Ось его устанавливается параллельно оси главного телескопа, и в фокусе его окуляра устанавливается крест нитей. Когда телескоп установлен так, что крест нитей искателя наведен на светило, то оно видно и в поле зрения главного телескопа.

Бывает, что телескоп приходится наводить на такие слабо светящиеся светила, которые не видны в искатель или положение которых среди знакомых звезд наблюдателю плохо известно. В таком случае пользуются разделенными кругами. Один из этих кругов находится на оси склонения, другой — на полярной оси. Зная по справочнику склонение светила и подсчитав его часовой угол в момент наблюдения, наблюдатель устанавливает телескоп по разделенным кругам на эти координаты, и светило появляется в поле зрения телескопа.

Телескопы обычно помещаются в башнях с вращающимися куполами, в которых делаются прорезы (люки), открываемые во время наблюдений. Для того чтобы теплый воздух, выходя из помещения через люк, не вызывал дрожания изображений в телескопе, люк башни открывают за некоторое время до начала наблюдений с тем, чтобы температура воздуха снаружи и внутри башни уравнилась.

§ 87. Рефракторы и астрографы. Главной оптической частью всякого рефрактора является объектив. Обычная линза со сферическими поверхностями, которая, вообще говоря, представляет собой простейший объектив, обладает, как известно из физики, *сферической аберрацией*, которая искажает изображение, получаемое в фокусе. Другим недостатком объектива является его *хроматическая аберрация*, т. е. неспособность собрать лучи разных цветов в одном и том же фокусе. Поэтому объективы всех телескопов делаются из двух линз со сферическими поверхностями, причем одна делается из кронгласа, другая из флинтгласа. Показатели преломления каждой линзы для лучей различных цветов и радиусы кривизны поверхностей линз подбираются таким образом, чтобы уменьшить сферическую аберрацию и чтобы лучи разных цветов по возможности собирались в одном фокусе. Практически удается свести в один фокус лучи только двух цветов спектра. Если в одном фокусе собираются желтые и зеленые лучи, то объектив будет визуальным; если в одном фокусе собираются фиолетовые и ультрафиолетовые лучи (сильнее всего действующие на обычную фотопластинку), объектив будет фотографическим. *Двухлинзовые объективы, ослабляющие хроматическую аберрацию, называются ахроматическими. Объективы, обычно трехлинзовые, дающие повышенную ахроматичность, называются апохроматами.* К сожалению, изготовлять апохроматы большого размера не удастся. Объективы астрографа стремятся сделать такими, чтобы они изображали на фотопластинке без искажений возможно больший участок неба (рис. 89). Обычно диаметр поля зрения астрографа составляет несколько градусов, но особенно светосильным астрографом можно сразу заснять довольно значительную область неба, охватывающую несколько созвездий. Масштаб снимка приближенно выражается формулой:

$$d = 2F \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

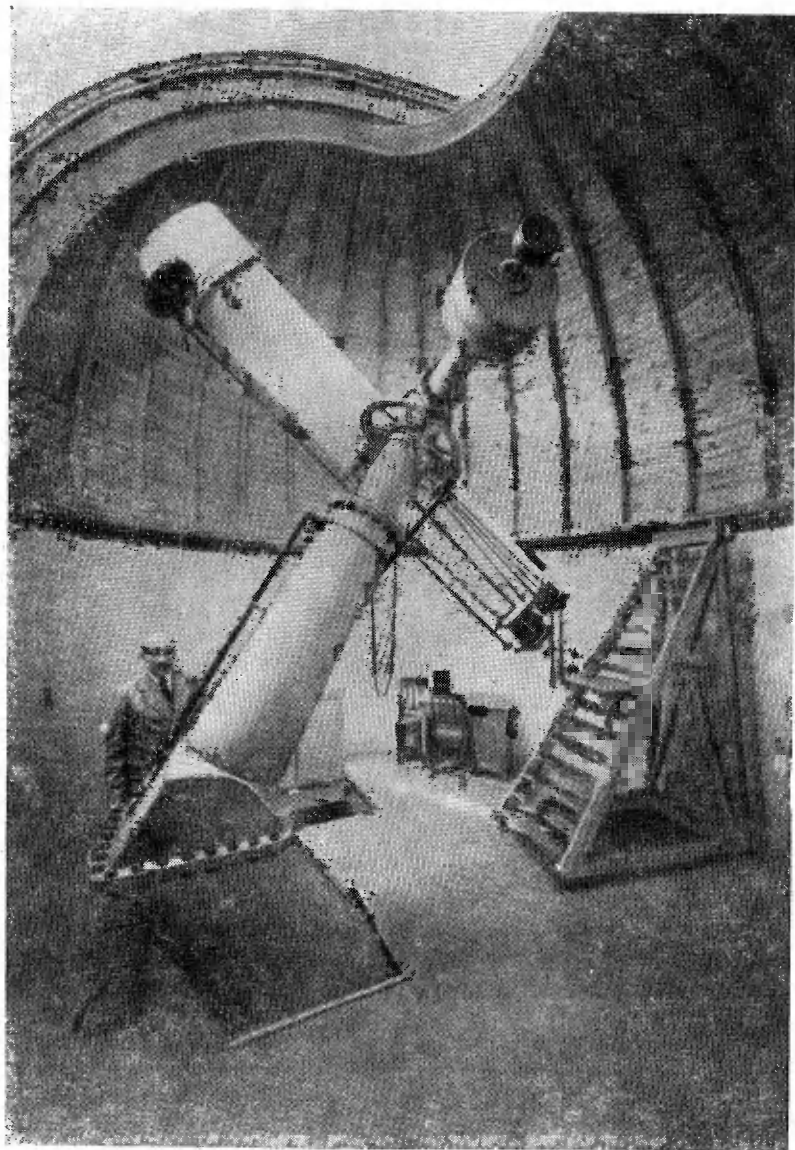


Рис. 89. Нормальный астрограф Пулковской обсерватории

где α — угловое расстояние двух точек на небесной сфере, d — их расстояние на снимке, а F — фокусное расстояние объектива. Другими словами, 1° небесной сферы изображается на фотографической пластинке отрезком, равным $1/_{57}$ длины фокусного расстояния астрографа (рис. 90).

Например, в фокусе телескопа с фокусным расстоянием в 1 м можно фотографировать Солнце или Луну (диаметр $0^\circ,5$) в виде кружков диаметром около 1 см.

Самодельный рефрактор, обладающий, конечно, невысокими качествами, но дающий увеличение до 30—40 раз, можно построить из стекол для очков.

Бинокль, в особенности призмный, представляет собой прибор, при помощи которого можно не только увидеть некоторые подробности на небесных светилах, но и производить ценные научные наблюдения.

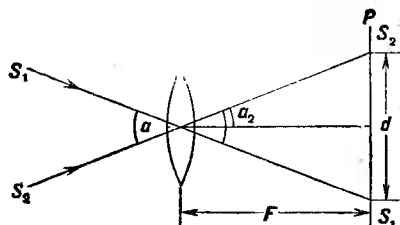


Рис. 90. Масштаб астрофотографии

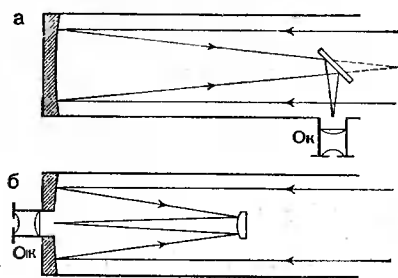


Рис. 91. Схемы рефлекторов:
а—Ньютона; б—Кассегрена

§ 88. Рефлекторы и их сравнение с рефракторами. Сферическая aberrация в рефлекторах устраняется на оптической оси тем, что поверхности главного зеркала придают форму параболоида вращения; но такую поверхность изготовить гораздо труднее, чем сферическую. Хроматической aberrации у рефлекторов нет. Однако ряд искажений изображения в стороне от

оптической оси зеркало все же дает. В прежнее время зеркала рефлекторов изготовлялись из металлических сплавов, но теперь они шлифуются исключительно из стекла, на которое потом наносится тончайший слой серебра или алюминия, отражающий до 90% падающего на них света. С течением времени отражающая поверхность посеребренных (в меньшей степени алюминированных) зеркал уменьшается, зеркало тускнеет, и его приходится серебрить заново (примерно ежегодно).

В настоящее время чаще всего применяются типы рефлекторов Ньютона и Кассегрена. В рефлекторе Ньютона (рис. 91, а) лучи, отразившись от большого параболического зеркала, попадают на малое плоское зеркало, расположенное на оптической оси большого зеркала и образующее с последней угол 45° , и выходят вбок в отверстие, сделанное в корпусе трубы телескопа. Фокус телескопа находится сбоку у верхнего конца рефлектора, где и устанавли-

вается окуляр или кассета с фотографической пластинкой. В рефлекторе Кассегрена (рис. 91,б) лучи, отразившись от параболического зеркала, падают на маленькое выпуклое гиперболическое зеркало и, отразившись от него сходящимся пучком, проходят через отверстие, высверленное в центре главного зеркала. В таком рефлекторе фокус, а следовательно, и окуляр или другие вспомогательные приборы располагаются у нижнего конца телескопа.

Поле зрения, дающее резкие изображения, у рефлектора сравнительно очень невелико; обычно оно не превышает $0^{\circ},5$. Поэтому, хотя рефлектор не имеет хроматической аберрации и в нем отсутствуют потери света при поглощении в линзе, роль фотографических рефракторов сохраняет свое значение.

При изготовлении рефлектора требуется точно отшлифовать только одну поверхность, тогда как у ахроматического объектива



Рис. 92. Схема менискового телескопа Д. Д. Максудова

нужно отшлифовать четыре поверхности. Кроме того, для изготовления объектива приходится получать огромные блоки стекла, однородного во всей своей массе, что достигается с большим трудом. Поэтому наибольший из существующих рефракторов по диаметру в 5 раз меньше наибольшего из суще-

ствующих рефлекторов. Надо заметить, что кустарными средствами хороший рефлектор изготовить тоже легче, чем плохой рефрактор. Без особых специальных приспособлений можно отшлифовать сферическое зеркало диаметром до 20 см.

За последнее время для фотографирования неба стали строить различные типы так называемых анаберрационных рефлекторов. В них для получения большого поля зрения, свободного от искажений, применяются либо комбинации зеркал особой формы, либо комбинации сферического зеркала со стеклянной пластинкой очень сложной формы, изготовление которой представляет весьма большие трудности.

Радикальное и притом весьма простое решение вопроса найдено советским ученым-оптиком Д. Д. Максудовым. Его основная идея состоит в том, чтобы исправить сферическую аберрацию зеркала сферической аберрацией линзы, причем линза не должна вносить заметной хроматической аберрации. Этим условиям, как оказалось, удовлетворяет тонкий *мениск*, т. е. выпукло-вогнутое сферическое стекло большой кривизны. Радиусы выпуклой и вогнутой сторон очень мало отличаются друг от друга, так что мениск имеет очень малую разницу толщины в середине и на краях. Мениск помещается в передней части трубы, и труба, таким образом, оканчивается закрытой, защищенной от воздушных течений и пыли и очень короткой (рис. 92). Изготовление просто, так как все оптические поверхности — сферические. Эту оптическую систему из

комбинации мениска со сферическим зеркалом, которая практически совершенно свободна от сферической и хроматической аберраций, автор называл *менисковой*. Такой менисковый телескоп может заменить и рефрактор для визуальных наблюдений и астрограф, будучи к тому же гораздо компактнее их (рис. 93).

§ 89. **Астрофотография и ее применение.** В сравнении с визуальными наблюдениями *фотография имеет следующие преимущества:*

1. *Моментальность* — свойство запечатлевать крайне кратковременные картины (при достаточном освещении), которых глаз не успевает точно запечатлеть в мозгу, например полет метеоров.

2. *Панорамность* — возможность одновременно заснять вид и положение целого ряда небесных тел, которые глаз может изучать лишь поочередно и с большой затратой времени.

3. *Детальность*, состоящая в точной передаче таких тонких деталей и полутонов, которые если и могут быть усмотрены, то не могут быть переданы никаким искусством художника.

4. *Интегральность* — способность накапливать световое действие с течением времени. Благодаря этому увеличение выдержки (экспозиции) позволяет фотографировать все более и более слабые объекты, уже недоступные для глаза при рассматривании в тот же телескоп.

5. *Документальность* — возможность повторно изучать фотографии, представляющие документы о состоянии небесных светил в определенные моменты.

6. *Возможность фотографировать в лучах спектра, недоступных глазу* (инфракрасных и ультрафиолетовых).

Для научного исследования, за редкими исключениями, пригодны лишь сами стеклянные негативы, а не отпечатки с них.

Обычная фотографическая пластинка чувствительна к сине-фиолетовым и ультрафиолетовым лучам и нечувствительна к инфракрасным лучам спектра; пластинки особого сорта, которые за последние годы стали наиболее распространенными, кроме того, чувствительны и к желтым лучам спектра (ортохроматические пластинки), и к красным лучам спектра (панхроматические пластинки), и даже к инфракрасным. Таким образом, фотография может вполне заменить человеческий глаз. Чувствительность современных пластинок и их зернистость ставят известное ограничение качеству астрономической фотографии.

Звезды на фотографиях выходят в виде кружков тем большего диаметра, чем ярче звезда или чем дольше была экспозиция. Это позволяет по диаметрам изображений звезд на пластинках определять их фотографическую звездную величину (в отличие от визуальной звездной величины, определяемой визуальными наблюдениями). Следует помнить, что заметный диаметр звезд на фотографиях есть чисто фотографический эффект, не имеющий никакого отношения к истинному угловому диаметру звезд. При очень больших экспозициях вокруг ярких звезд получают ореолы

вследствие отражения света от задней стеклянной стороны фотопластинки. Большую роль в астрофотографии играет применение светофильтров. *Светофильтром* называется окрашенная среда (чаще всего в виде цветного стекла), устанавливаемая перед пластинкой или перед объективом и пропускающая те или другие лучи из состава света, излучаемого небесными светилами.

§ 90. История развития телескопов. Телескоп был изобретен в 1608—1609 гг., по-видимому, независимо друг от друга различными лицами. Применение телескопа к астрономическим наблюдениям (в 1609 г.) является, как известно, заслугой Галилея, который в качестве окуляра применил двояковогнутую линзу. В настоящее время такая комбинация двояковогнутого объектива и двояковогнутой линзы в качестве окуляра применяется только в так называемом театральном бинокле. Лучший из телескопов, построенных Галилеем, увеличивал в 30 раз. Все современные рефракторы устраиваются сейчас по системе Кеплера (выпуклая линза для окуляра), предложенной им в 1611 г. Первоначально для ослабления влияния аберраций телескопы делались чрезвычайно длиннофокусными. Работы Эйлера и Эпинуса в Петербурге в середине XVIII в. открыли возможность изготовления ахроматических объективов, что позволило уменьшить длину телескопов и повысить их качество.

Первая система рефлектора была предложена в 1663 г. Грегори, а в 1668 г. Ньютон построил первый рефлектор по своей системе. Этот рефлектор давал увеличение в 39 раз.

В 1762 г. М. В. Ломоносов сконструировал новый рефлектор с наклонным зеркалом, которое отражало лучи к переднему концу телескопа, где помещается глаз, так что не требовалось второго зеркала. Ломоносов так описывал преимущества своей конструкции: «Новоизобретенная мною катадиоптрическая зрительная труба тем должна быть превосходнее невтоннианской и григорианской, что 1) работа меньше для того, что малого зеркала не надобно, а потом 2) и дешевле, 3) не загораживает большого зеркала и свету не умаляет...» (М. В. Ломоносов, Полное собрание сочинений, т. IV, стр. 407, 1955). Эта труба и была им построена и испытана, как видно из следующей записи: «... učinена проба трубы катадиоптрической об одном зеркале, и мое изобретение произошло в действие с желаемым успехом» (там же, стр. 412).

Такую же конструкцию применил при построении своих телескопов В. Гершель в Англии (с 1775 г.). Он достиг большого совершенства в шлифовке металлических зеркал и стал строить рефлекторы все возрастающих размеров, дойдя до телескопа с зеркалом диаметром в 120 см. При помощи этих телескопов-гигантов было сделано множество открытий. Однако трудность шлифовки металлических зеркал и необходимость их перешлифовывать, после того как металл довольно быстро тускнел, не вызвали большого числа подражаний, рефлекторы были забыты до начала XX в., и все внимание было опять обращено на постройку больших рефракторов. В конце XIX в. самым большим в мире рефрактором обладала Пулковская обсерватория, для которой был изготовлен 30-дюймовый (76 см в диаметре) объектив из лучшего оптического стекла (рис. 94). Этот телескоп превосходил по своим размерам и наблюдательным качествам все до того существовавшие и дал возможность Пулковской обсерватории сделать ряд новых работ и открытий. Впоследствии в США был построен еще рефрактор с объективом в 40 дюймов, или в 1 м в диаметре.

С начала XX в. после изобретения (в 1879 г.) стеклянных зеркал, покрытых слоем серебра, рефлекторы вновь привлекли к себе внимание, и к 1914 г. был изготовлен телескоп с 2,5-метровым зеркалом для установки на горе Вильсона в Калифорнии (рис. 95). В последние годы Калифорнийский технологический институт совместно с обсерваторией Маунт Вильсон построил новый телескоп-гигант с зеркалом диаметром в 5 м.

В царской России не существовало производства больших астрономических приборов, и лишь после Великой Октябрьской социалистической революции индустриализация нашей страны создала базу для производства астрономических приборов. Советская промышленность выпустила несколько рефлекторов среднего размера и партию рефлекторов школьного типа системы

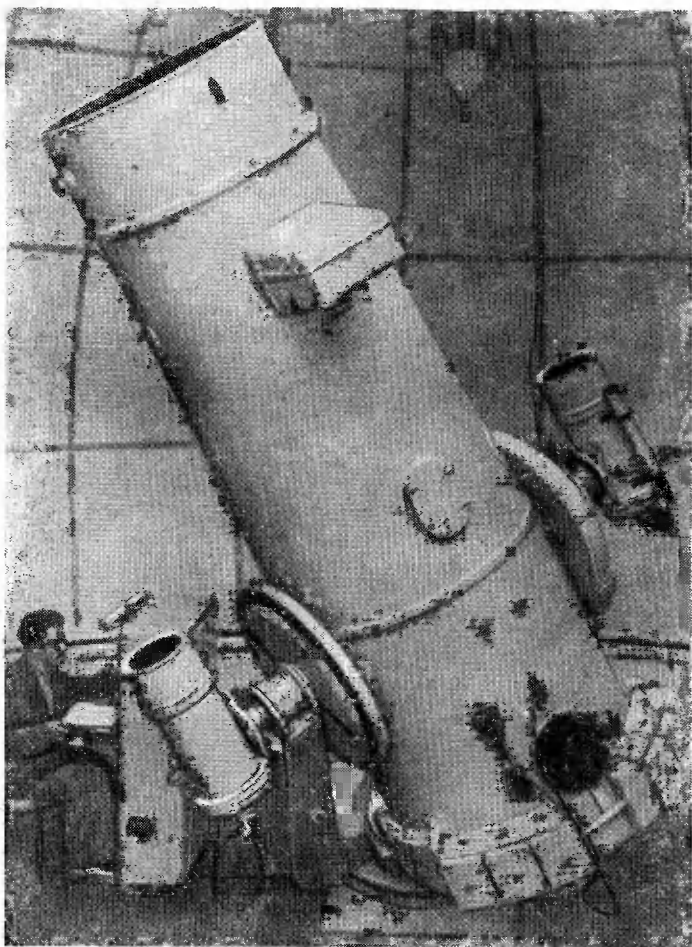


Рис. 93. 70-сантиметровый менисковый телескоп конструкции Б. К. Ионнисиани

Максутова. Для наблюдения солнечных затмений 1936 г. и 1941 г. советской промышленностью и мастерскими астрономических учреждений был создан ряд чрезвычайно тонких специальных приборов высокого качества. В настоящее время ряд советских обсерваторий оборудован крупными приборами отечественного производства, из которых некоторые являются уникальными. Приступлено к изготовлению рефлектора диаметров 2,6 м и более.

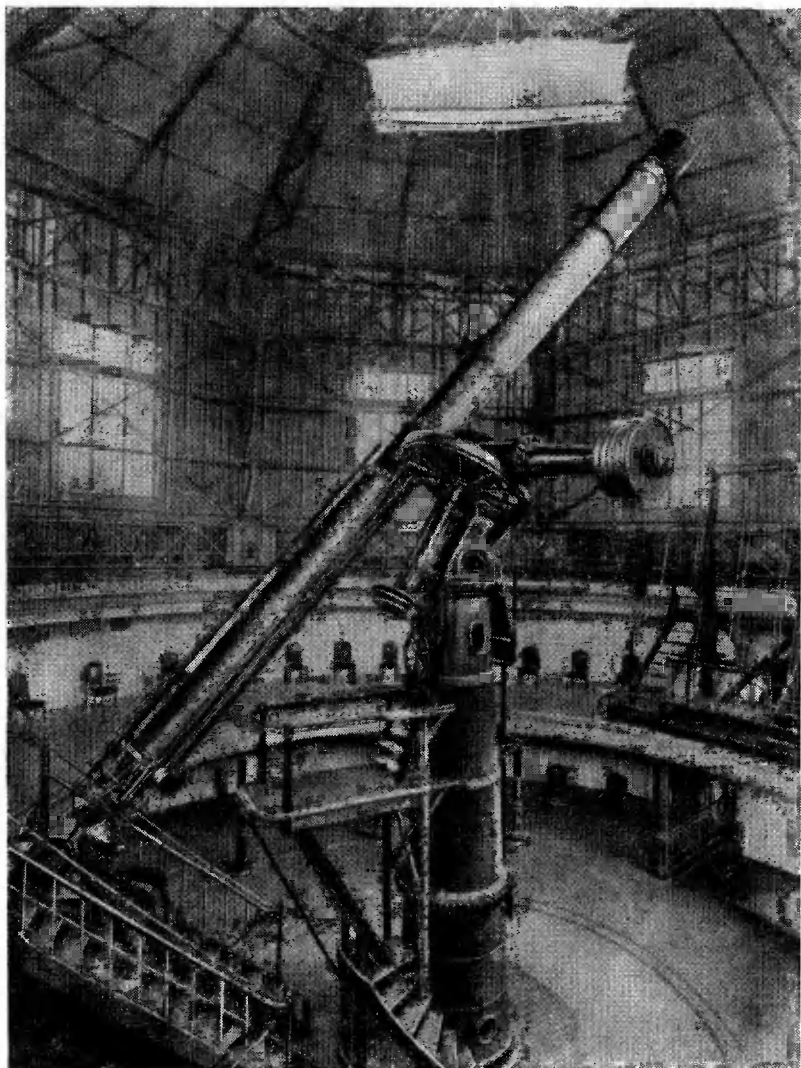


Рис. 94. Большой 76-сантиметровый рефрактор Пулковской обсерватории до ее разрушения немецкими захватчиками

§ 91. Измерения и исследования астрофотографий. Астрономические негативы представляют собой большую научную ценность, потому что они отражают состояние небесных светил в определенные моменты. Негативы, полученные на обсерватории, составляют так называемую стеклянную библиотеку, и на некоторых обсерваториях число пластинок в этих библиотеках доходит до нескольких

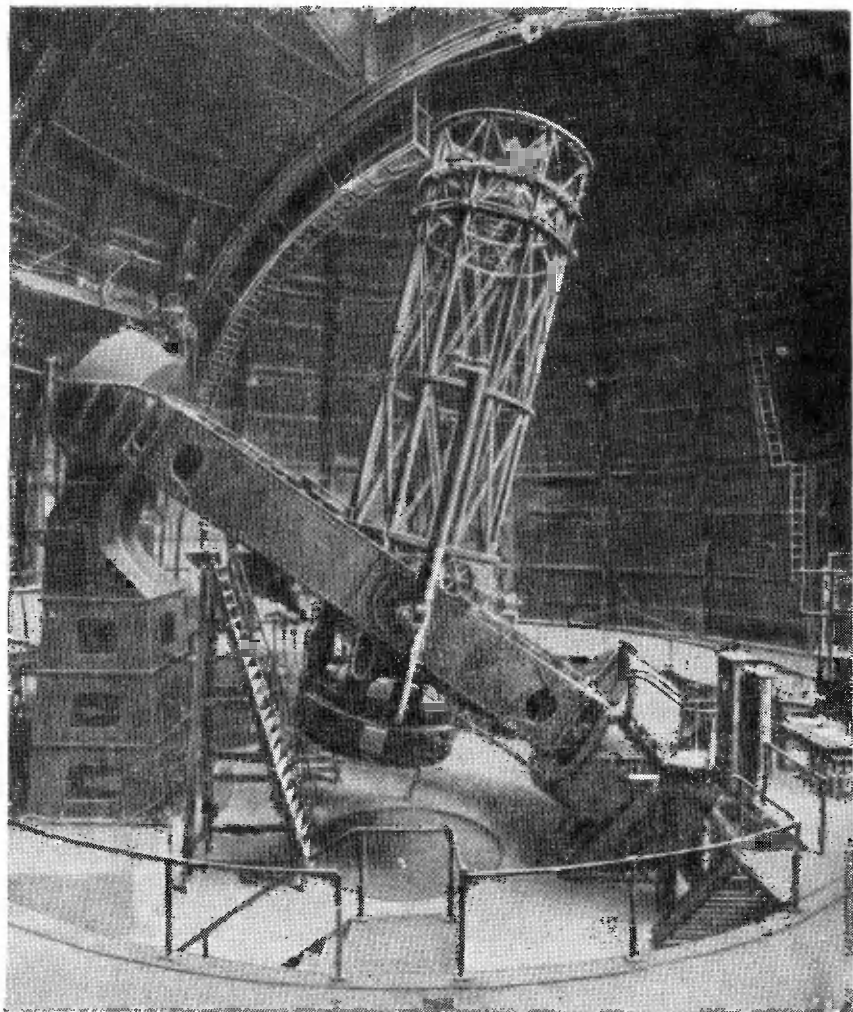


Рис. 95. Стодюймовый (2,5-метровый) рефлексор

сотен тысяч. Сравнивая между собой фотографии одного и того же участка неба, полученные в различные годы, можно судить о происшедших в этой области изменениях: об изменении блеска звезд и об изменении их положения на небесной сфере вследствие их перемещения в пространстве и т. п. Однако наблюдаемые изменения настолько ничтожны, что только самые тщательные измерения на пластинке с точностью до тысячных долей миллиметра могут их обнаружить.

На рисунке 96 изображен общий вид измерительного прибора такого рода, при помощи которого с точностью до тысячных долей миллиметра измеряются прямоугольные координаты звезд на пластинке. Окуляр измерительного прибора, в который рассматривается негатив, снабжен микрометром, подобным нитяному микрометру экваториала. Таким микрометром, не двигая пластинки, измеряют небольшие расстояния между точками на пластинке. Для измерения больших расстояний весь негатив при помощи двух взаимно перпендикулярных микрометрических винтов движется в своей плоскости под микроскопом прибора. Цена оборота

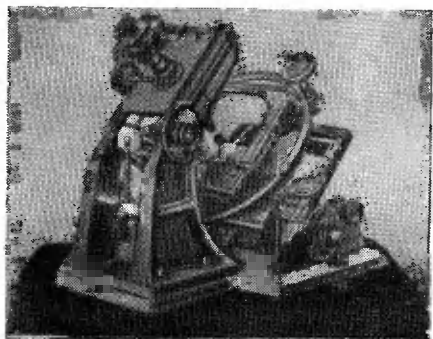


Рис. 96. Прибор для измерения координат на фотопластинке

каждого микрометрического винта точно известна, и, таким образом, по числу поворотов винта, на которые нужно передвинуть пластинку, чтобы перейти от одной точки к другой, измеритель может точно определить расстояние между указанными точками на негативе. Зная сферические координаты (прямое восхождение и склонение) некоторых звезд, видимых на данном негативе, можно вычислить прямое восхождение и склонение остальных звезд по их измеренным прямоугольным координатам.

Для того чтобы быстрее подметить перемещение звезды, применяется прибор, называемый стереокомпаратором. *Стереокомпаратор представляет собой своего рода стереоскоп*, в который наблюдатель рассматривает одновременно два негатива, снятые с одной и той же области неба в различное время. Обе пластинки располагаются в приборе таким образом, что наблюдатель видит их изображения совпадающими. Если какая-нибудь звезда в промежутке между снимками передвинулась на пластинке заметным образом, то она, так сказать, «выскочит» из картинной плоскости и будет казаться расположенной на переднем плане ближе к наблюдателю.

Для обнаружения изменения блеска звезд служит прибор, названный *блнк-микроскопом*. Этот прибор устроен так же, как стереокомпаратор, с тем различием, что в окуляре его, по желанию наблюдателя, становятся поочередно видны то одна, то другая пластинка. Быстро колебля заслонку в окуляре, поочередно закрывающую то ту, то другую пластинку, наблюдатель может легко сравнивать изображения звезд одной пластинки с их изображениями на другой пластинке. Если какая-нибудь звезда на двух снимках имеет по отношению к соседним неодинаковый блеск, то это сей-

час же выявится своеобразным «мерцанием» звезды. Еще легче таким способом обнаружить комету или планету, которая вследствие своего быстрого движения на двух последовательных снимках занимает разные положения.

§ 92. Основы астрофотометрии. Астрофотометрия, т. е. измерение общего излучения небесных светил, дает чрезвычайно ценные сведения о природе этих светил. Излучение светил, или, как говорят, их радиация, может быть воспринято различными приборами. Приемниками радиации являются: глаз, фотопластинка, фотоэлемент, термоэлемент, радиометр, болометр. Первые три являются селективными, т. е. их чувствительность к лучам различных длин волн различна. Три последних являются не-селективными и одинаково чувствительными к излучению любой длины волны. Поэтому суммарный блеск небесных светил воспринимается глазом, фотопластинкой, радиометром и т. д. неодинаково.

Чувствительность человеческого глаза и фотопластинки к лучам различной длины волны представлена на рисунке 97. На нем видно, что глаз наиболее чувствителен

к желтым лучам спектра с длиной волны $0,55\mu$ или $550 \text{ м}\mu$ (миллимикрон). Пределом чувствительности человеческого глаза являются красные лучи (около $680 \text{ м}\mu$) и фиолетовые (около $430 \text{ м}\mu$). Обычная фотографическая пластинка имеет наибольшую чувствительность в фиолетовом цвете ($440 \text{ м}\mu$), а предел ее чувствительности простирается от ультрафиолетового до сине-зеленого цвета. Специальные сорта пластинок чувствительны также к желто-красной и даже к инфракрасной части спектра до $12\,000 \text{ \AA}$, совершенно недоступной глазу.

Представим себе, что какое-нибудь небесное светило испускает только красные и ультрафиолетовые лучи, причем энергия излучаемых им красных лучей вдвое больше энергии излучаемых им ультрафиолетовых лучей. В таком случае блеск этого светила для фотографической эмульсии будет примерно вдвое слабее, чем блеск его для глаза. Неселективный приемник радиации оценит блеск того же объекта примерно в полтора раза большим, чем глаз, и раза в три большим, чем фотографическая пластинка.

Таким образом, блеск небесных светил, выраженный в звездных величинах, следует различать в зависимости от способа его измерения: говорят о звездных величинах *визуальных*, *фотографических*, *фотоэлектрических*, *радиометрических* и *болометрических*.

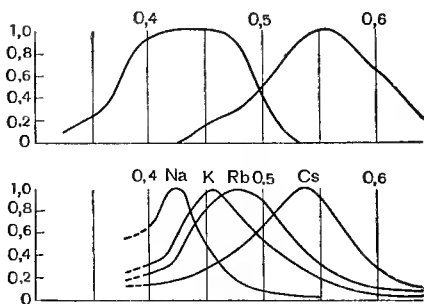


Рис. 97. Кривые цветочувствительности: *вверху* — глаза (справа) и обычной фотографической пластинки (слева); *внизу* — щелочных фотоэлементов

Если кривая чувствительности приемника радиации в функции длины волны известна и известно распределение энергии в спектре светила, то блеск звезды, измеренный одним способом, например фотографически, может быть теоретически пересчитан на блеск визуальный или другой. *Радиометр и болометр характеризуют полное излучение небесного светила на всем протяжении его спектра.*

Радиометр, как известно из физики, представляет собой стеклянный баллон, внутри которого устроен вакуум и на тонкой упругой нити подвешено крылышко с двумя лопастями, напоминающее крылья мельницы. Одна из лопастей крылышек зачернена и поглощает все падающие на нее лучи. Другая же лопасть кры-

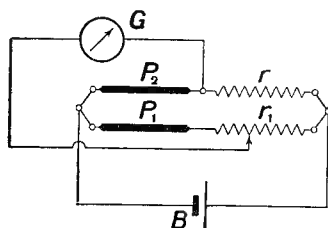


Рис. 98. Схема болометра

лышка полирована и отражает падающую на него энергию. На нити укреплено маленькое зеркальце, на которое падает луч света от лампочки, отражающийся от зеркальца на специальную шкалу или на медленно вращающийся барабан с накрутой на него фотографической бумагой. Когда энергия падает на зачерненное крылышко, последнее поглощает всю упавшую на него энергию, нагревается, и усилившееся вблизи него движение молекул воздуха за-

ставляет крылышко повернуться. Величина угла поворота определяется количеством упавшей на крылышко энергии и сопротивлением нити закручиванию, которое устанавливается специальным опытом. Таким образом, по углу отклонения крылышка радиометра, который регистрируется при помощи светящегося зайчика на упомянутой выше шкале или фотографической бумаге, можно измерять энергию, падающую на радиометр.

Болометром называется прибор, схема которого изображена на рисунке 98. Две зачерненные полоски P_1 и P_2 включены в плечи мостика Уитстона. Одна из полосок выставляется под действие падающей на нее энергии, а другая помещается в тени. Поглощая падающую на нее энергию, зачерненная пластинка нагревается, и ее сопротивление меняется. По силе тока, регистрируемого гальванометром G , измеряют величину энергии, упавшей на зачерненную полоску болометра. Если одна из зачерненных полосок болометра может перемещаться вдоль спектра, то такая комбинация спектроскопа и болометра называется *спектроболометром*.

§ 93. Шкала звездных величин. Еще два тысячелетия назад Гиппархом было предложено деление звезд по их блеску на звездные величины. Такой способ выражать блеск звезд удержался до настоящего времени. Нужно твердо помнить, что звездная величина выражает блеск звезды, а не ее размеры.

Когда в середине XIX в. основы научной фотометрии были применены к астрономии, то оказалось, что привычное для астро-

номов деление звезд на звездные величины основывается на психофизиологическом законе Вебера—Фехнера.

Закон этот заключается в том, что *если раздражения меняются в геометрической прогрессии, то соответствующие им ощущения изменяются в арифметической прогрессии*. В нашем случае раздражающим фактором является блеск звезды.

Обозначив блеск звезд, отличающихся друг от друга точно на одну звездную величину, через E_m и E_{m+1} , мы имеем:

$$\frac{E_m}{E_{m+1}} = \text{const.} \quad (1)$$

Исследование старых звездных каталогов показало, что у всех наблюдателей отношение блеска звезд двух соседних звездных величин E_m и E_{m+1} довольно точно сохраняется близким к 2,5. Отношение $E_m : E_{m+1}$ окончательно принято равным 2,512; десятичный логарифм этого числа составляет 0,400. Таким образом, пришли к следующему определению понятия звездной величины: *интервалом блеска в одну звездную величину называется такой интервал, когда блеск одного объекта в 2,512 раз больше блеска другого объекта*. Пусть m_1 и m_2 — звездные величины двух объектов; E_{m_1} и E_{m_2} — соответствующий их блеск, так что $E_{m_1} > E_{m_2}$ и $m_2 < m_1$. Мы можем, следовательно, написать:

$$\frac{E_{m_1}}{E_{m_2}} = 2,512^{(m_2 - m_1)},$$

или

$$\lg \frac{E_{m_1}}{E_{m_2}} = 0,4 (m_2 - m_1), \quad (2)$$

или

$$(m_2 - m_1) = 2,5 \lg \frac{E_{m_1}}{E_{m_2}}. \quad (2')$$

Выражение (2) носит название формулы Погсона. За основу при определении звездных величин приняты звездные величины, установленные для ряда околополярных звезд, с которыми и сравниваются все остальные звезды.

Следует заметить, что астрономы обычно говорят о *яркостях* звезд, тогда как, если придерживаться строго терминологии, принятой в фотометрии и светотехнике, то о яркости звезд, видимых как бесконечно удаленные светящиеся точки, мы в сущности не имеем права говорить, а можем говорить лишь о создаваемых звездами *освещенностях* на Земле. Таким образом, в звездных величинах мы выражаем, в сущности говоря, не яркость звезд, под которой следовало бы понимать яркость единицы их поверхности, а выражаем освещенности, которые они создают на Земле. Ввиду некоторого неудобства оперировать в астрономии термином «ос-

вещность» мы дали приведенное выше определение, используя термин «блеск», смысл которого здесь достаточно ясен, но которому в других областях науки не приписывается такого строго определенного значения, какое приписывается физиками слову «яркость».

Нулевая точка в шкалах звездных величин установлена весьма сложным образом. Но если условиться, что такая-то звезда имеет определенную звездную величину, то звездные величины всех остальных небесных светил мы сможем выразить по отношению к этой опорной звезде. По ряду причин подобных опорных звезд взято несколько. Для связи с лабораторными физическими величинами укажем, что звездная величина международной свечи, помещенной на расстоянии 1 км, равна $+0,8$ или что звездная величина люкса равняется $-14,18$.

Посредством особых приемов можно сравнить освещенность, даваемую Солнцем, Луной и другими светилами, с освещенностями, даваемыми звездами, и определить отсюда их звездную величину. Таким образом, найдено, что визуально видимая звездная величина Солнца составляет $-26,7$, Луны в полнолуние $-12,6$. Освещенность, создаваемая в зените, составляет в люксах вне атмосферы:

Солнцем	130 000
Полной Луной	0,2
Звездой 1-й звездной величины	$8 \cdot 10^{-7}$

§ 94. Визуальная фотометрия. Определение звездной величины небесных светил всегда сводится к установлению того, насколько звездная величина данного небесного светила разнится от звездной величины светила, принятого за источник сравнения.

Сравнение звездных величин двух небесных объектов чаще всего производится при помощи вспомогательного искусственного источника света, яркость которого по желанию наблюдателя может меняться в произвольном, но строго известном отношении. Фотометры устроятся таким образом, что наблюдатель видит рядом в поле зрения окуляра телескопа, к которому привинчивается фотометр, естественную звезду и искусственную, создаваемую светом электрической лампочки, прошедшим через маленькое отверстие и систему линз. В большинстве случаев при помощи оптической системы, поставленной на пути луча, идущего от лампочки, наблюдатель изменяет блеск искусственной звездочки до тех пор, пока не уравнивает его с блеском естественной звезды. Затем он наводит телескоп на звезду сравнения, звездная величина которой известна, и опять добивается равенства блеска естественной звезды и искусственной. Зная, в каком отношении он должен был изменить блеск искусственной звездочки, переходя от одного наблюдения к другому, он может выразить это отношение как разность звездных величин. Измерения при помощи визуальных фотометров дают результаты с точностью до нескольких сотых звездной величины.

Несколько менее точные результаты, но все же достигающие у опытных наблюдателей почти такой же точности, дают непосред-

ственные глазомерные сравнения блеска звезд. Чтобы определить звездную величину какой-нибудь звезды v , наблюдатель подбирает вблизи нее две звезды a и b , одна из которых была бы ярче, чем v , и звездные величины которых были бы уже известны на основании точных фотометрических измерений. Сравнивая блеск звезд a , b и v друг с другом, наблюдатель мысленно разбивает интервал блеска между звездами a и b на 10 равных частей и оценивает, где в этом интервале располагается по своему блеску звезда v . Если, например, по своему блеску звезда v на 0,6 интервала слабее звезды a (и, следовательно, на 0,4 интервала ярче звезды b) и если звездные величины звезд a и b соответственно равны 4,70 и 5,90, то, очевидно, звездная величина звезды v может быть вычислена следующим образом:

$$m_v = 4,70 + \frac{1,20}{10} \cdot 6 = 4,70 + 0,72 = 5,42.$$

Этот способ глазомерных оценок чрезвычайно прост, легко усваивается, и поэтому им пользуются чрезвычайно широко, в особенности для наблюдения многочисленных переменных звезд (т. е. звезд, меняющих свой блеск). Такие наблюдения доступны широкому кругу астрономов-любителей. Для них разработаны подробные инструкции.

§ 95. Фотографическая фотометрия. По фотографии можно определить как относительные звездные величины, так и распределение яркости по видимой поверхности таких небесных светил, как туманности, планеты и т. п. Для определения звездных величин звезд по фотографиям пользуются тем свойством, что диаметры изображений звезд на снимках растут с уменьшением их звездной величины (при одной и той же экспозиции). Если путем специального исследования установить изменение диаметра изображения звезды на фотографии как функцию ее звездной величины (при данной экспозиции), то, измеряя диаметры изображений звезд, подлежащих исследованию, можно определить их звездную величину. При этом условились считать, что белые звезды спектрального класса А имеют одинаковую звездную величину, как визуальную, так и фотографическую. Вследствие свойства пластинки, описанного в § 92, голубые звезды выходят на фотографии более яркими, а красные более слабыми, чем белые звезды той же визуальной звездной величины. Существуют и другие методы определения звездных величин точечных объектов. Точность фотографической фотометрии примерно такого же, как и точность визуальной фотометрии.

Для изучения распределения яркости по видимой поверхности небесных светил пользуются свойством фотографической пластинки, состоящим в том, что почернение негатива при данной экспозиции возрастает с усилением его освещенности. Прямой пропорциональности между этими двумя величинами нет, и задача состоит в том, что для каждого сорта фотографических пластинок нужно установить, как почернение негатива возрастает с увеличением его освещенности.

Измерение почернения фотографического негатива производится посредством особых приборов, так называемых *микрофотометров*. Микрофотометр позволяет измерить отношение интенсивности света, проходящего через исследуемое место негатива, к интенсивности света того же источника света, прошедшего через прозрачное место негатива, не подвергнувшегося действию света.

§ 96. **Фотоэлектрические фотометры.** Принцип фотоэлектрического эффекта широко используется в физике и технике. Фотометры, основанные на принципе фотоэлектрического эффекта, дают наибольшую точность, достигающую до 2—3 тысячных звездной величины.

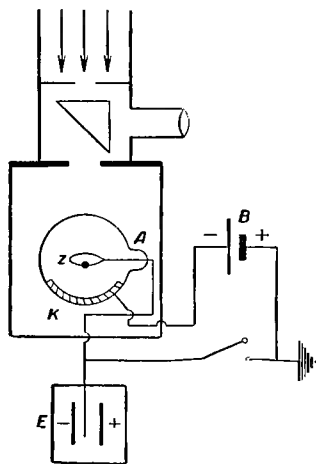


Рис. 99. Схема фотоэлектрического фотометра

Схема устройства фотоэлектрического фотометра представлена на рисунке 99, где *A* — стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, *K* — тонкий слой щелочного металла (калий, натрий, рубидий, цезий и т. п.), нанесенный на внутреннюю поверхность баллона *A*, а *Z* — проволочное кольцо, соединенное с нитью электрометра *E*, помещенной между двумя ножами, на которые наложены потенциалы, поддерживаемые батареями. Свет небесного светила через объектив телескопа попадает на металлический слой, и из него вырываются электроны, осаждающиеся на кольцо *Z*. Таким образом, *K* является катодом, а *Z* — анодом. Сила возникающего тока, пропорциональная освещенности фотоэлемента, регистрируется отклонением нити электрометра, на которой накапливается электрический заряд. Для того чтобы катод не заряжался положительно

вследствие потери электронов, он соединяется с отрицательным полюсом аккумулятора *B*, а накапливающийся на кольце *Z* заряд после отсчета электрометра отводится в землю.

В последнее время все шире входят в практику более чувствительные и более удобные электрофотометры, основанные на применении так называемых фотоумножителей.

§ 97. **Астрономические обсерватории.** Для изучения небесных светил и обслуживания практических запросов страны организуются астрономические обсерватории и научно-исследовательские институты. На обсерваториях ведутся наблюдения, которые обрабатываются и трактуются теоретически или в той же обсерватории, или в каком-либо институте. Существуют специализированные обсерватории, например ведущие службу времени и определение координат звезд или занимающиеся исключительно астрофизическими исследованиями. Бывают обсерватории смешанного типа.

Большая современная астрономическая обсерватория располагает хорошим меридианным кругом, при помощи которого по принятой программе определяются координаты звезд и планет. Пассажный инструмент регулярно используется для определения поправки часов. Иногда другие пассажные инструменты частично выполняют ту же задачу, что и меридианный круг, — определение координат светил. Если обсерватория несет службу времени, то у нее имеется большое «часовое хозяйство» и богатая аппаратура для хранения времени, передачи его по радио, по приему радиосигналов и по изучению свойств часов и самой аппаратуры, передающей время, — это целая электрорадиолaborатория.

Главным астрофизическим прибором обычно является большой рефрактор или рефлектор, или оба эти инструмента. При их помощи ведутся фотографические или спектральные наблюдения. Для визуальных наблюдений (с нитяным микрометром или фотометрических) обычно применяется рефрактор меньших размеров. Для фотографических работ бывают установлены астрографы, как длиннофокусные, так и короткофокусные.

Как правило, каждый астрономический инструмент устанавливается в отдельной башне с вращающимся куполом, в котором сделан раздвижной люк для наблюдений. В случае крупных телескопов вращение купола, раздвижение или закрывание створок люка и перемещение площадки с наблюдателем вслед за окулярным концом телескопа производится при помощи электромоторов. Температура воздуха внутри башни должна быть одинакова с температурой наружного воздуха. Иначе через люк купола устремятся токи воздуха, которые будут искажать наблюдаемые изображения светил.

Наблюдения и их обработка производятся по заранее составленному плану, и в настоящее время астрономические открытия редко бывают случайными — это плод продуманной, планомерной работы. Самый процесс наблюдений составляет меньшую часть исследовательской работы в области астрономии, хотя многие ученые занимаются почти исключительно добыванием фактических данных путем наблюдений — зачастую это требует особого искусства и постоянной практики.

Для всестороннего изучения полученных фотографий и спектрограмм в больших обсерваториях устроены измерительные лаборатории, где установлены приборы для измерения координат на пластинке, блинкмикроскопы и стереокомпараторы, микрофотометры и т. п. На обсерваториях начинают применяться все чаще и установки для изучения радиоизлучений, посылаемых небесными светилами, хотя ввиду специфики таких исследований *радиотелескопы* (рис. 107—108) устанавливаются радиофизиками и вне обсерваторий. Иногда при обсерватории находится и небольшая вспомогательная физическая лаборатория, непременно имеются механические мастерские для ремонта приборов, создания новых конструкций и т. п.

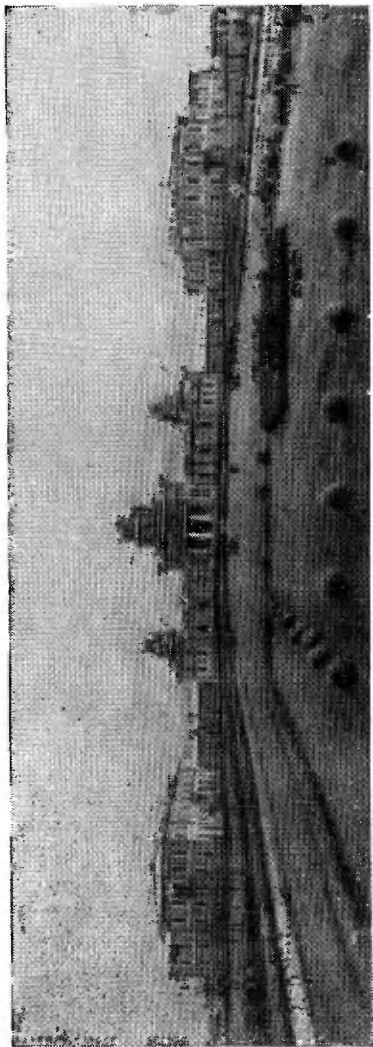


Рис. 100. Пулковская обсерватория после ее восстановления в 1953 г.
(*вверху* — северный фасад, *внизу* — южный внутренний)

Многие астрономические работы могут быть выполнены лишь посредством коллективной работы обсерваторий, расположенных на разных географических широтах или долготах. Примерами их являются «служба Солнца», «служба времени», изучение колебания широт, создание фотографической карты неба и другие. Открытия, сделанные на одной обсерватории, проверяются или уточняются работами других обсерваторий. Для лучшей увязки ряда научных вопросов созываются астрономические съезды. Международный съезд астрономов в 1958 г. состоялся в Москве.

В Советском Союзе наука получила для своего развития немислимые дотоле возможности. Из ряда астрономических научных

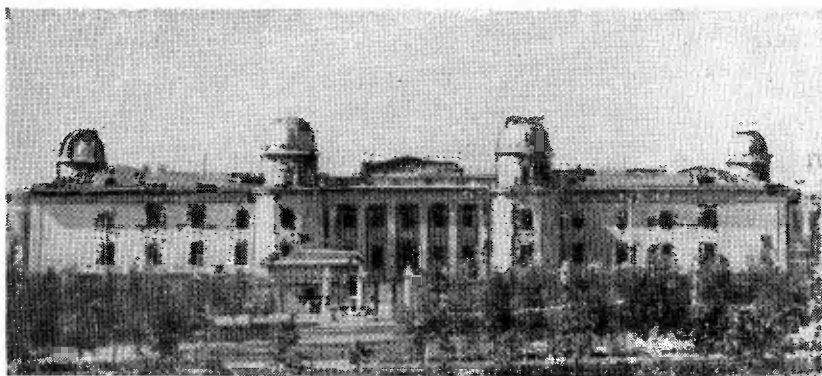


Рис. 101. Главное здание Московской обсерватории Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга на Ленинских горах

учреждений СССР всем известна Главная астрономическая обсерватория Академии наук СССР (Пулковская обсерватория под Ленинградом, рис. 100). Крупнейшим является и Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга при Московском государственном университете (рис. 101). Их работа занимает видное место в ряду работ крупнейших обсерваторий мира. В Пулковской обсерватории находился один из крупнейших в мире рефракторов, а в Крымской обсерватории — рефлексор диаметром в 125 см. Симеизская обсерватория вместе с вновь построенной обсерваторией вблизи с. Партизанское под Симферополем образовала новую Крымскую астрофизическую обсерваторию, являющуюся одной из крупнейших в Европе.

Значительные обсерватории находятся в Ташкенте, Казани, Харькове, Киеве, Абастумани (Грузинская ССР), Одессе, Сталинабаде, Бюракане (Армянская ССР), близ Алма-Аты (Казахская ССР). Строится ряд новых обсерваторий.

Партия и правительство, превратив нашу страну из аграрной в индустриальную, создали все условия, необходимые для того,

чтобы отечественная оптико-механическая промышленность вооружила советские обсерватории первоклассными астрономическими приборами, и многое для этого уже сделано.

§ 98. Основы спектрального анализа. Совершенно исключительная роль среди астрофизических методов исследования принадлежит спектральному анализу. Напомним здесь вкратце необходимые нам для дальнейшего основные сведения о нем.

Различают три вида спектров. *Спектры непрерывные представляют собой полосу всех цветов радуги. Спектры излучения состоят из ярких линий или полос на темном фоне. Спектры поглощения состоят из темных линий или полос на фоне непрерывного спектра.* Раньше считали, что непрерывные спектры дают только раскаленные твердые или жидкие тела. Теперь известно, что непрерывный спектр может давать также и раскаленный газ, молекулы или атомы которого в значительной своей части ионизированы. Непрерывный спектр дается таким газом в случае, если плотность газа достаточно велика или толщина нагретого газа достаточно обширна. *Спектр излучения дают разреженные газы и пары, находящиеся в состоянии свечения, которое может быть вызвано не только высокой температурой, но и другими способами, например пропусканием через них электрического тока. Спектр поглощения получается в том случае, если перед источником света, дающим непрерывный спектр, помещаются более холодные пары или газы.* Последнее явление определяется, как известно, законом Кирхгофа, по которому *всякий газ поглощает как раз те лучи, которые он способен испускать.*

Известно, что каждый химический элемент и каждое химическое соединение в газообразном состоянии дают спектр излучения, состоящий из линий или полос, занимающих в спектре строго определенных места. Ионизированные атомы и молекулы дают спектры, отличные от спектров нормальных атомов и молекул. Вследствие этого по линиям спектров можно устанавливать химический состав и физическое состояние самого светящегося тела. *В случаях звезд и Солнца, дающих спектры поглощения, мы производим анализ химического состава их наружных слоев (атмосфер), так как именно эти слои, будучи холоднее недр звезд и Солнца, поглощают их свет и вызывают появление в спектре темных линий.*

Для небесных тел, не испускающих собственного света, как, например, Луна и планеты, спектральный анализ не может дать тех результатов, как для Солнца и звезд. Но если планета окружена атмосферой, то солнечный свет, прежде чем отразиться от поверхности планеты, проходит через эту атмосферу и поглощается в ней, а отразившись от поверхности, прежде чем дойдет до земного наблюдателя, снова проходит через атмосферу планеты и снова поглощается. *Поэтому в спектрах планет, имеющих атмосферы, по сравнению со спектром Солнца, отраженным светом которого они светят, могут быть видны добавочные линии, обусловленные химическим составом планетных атмосфер и позволяющие нам изучать их строение.*

Как спектры излучения, так и спектры поглощения делятся на линейчатые и полосчатые. *Линейчатые спектры даются атомами химических элементов, а полосчатые спектры — молекулами химических элементов или их соединений.*

§ 99. Законы излучения. Принцип Доплера—Физо. В астрофизике большое применение имеют законы излучения абсолютно черного тела: законы Вина, Планка и Стефана—Больцмана.

Закон Вина гласит: *Длина волны λ_m , в которой лучеиспускание абсолютно черного тела максимально, обратно пропорциональна его абсолютной температуре T , т. е.*

$$\lambda_m = \frac{c}{T},$$

где c — постоянная Вина, равная (в системе CGS) $0,2890 \text{ см} \cdot \text{град}$.

Отсюда видно, что с повышением температуры абсолютно черного тела длина волны максимального излучения в спектре тела перемещается в сторону коротких длин волн.

Формула Планка выражает распределение энергии в спектре абсолютно черного тела (см. рис. 180 на стр. 349); она пишется так:

$$E(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)},$$

где E — интенсивность в данной точке спектра, c_1 и c_2 — постоянные ($c_1 = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} \cdot \text{сек}^{-1} \text{ см}^2$; $c_2 = 1,4350 \text{ см} \cdot \text{град}$).

Закон Стефана—Больцмана гласит: *Полное излучение энергии в единицу времени с единицы поверхности абсолютно черного тела пропорционально четвертой степени его абсолютной температуры, т. е.*

$$E = \sigma T^4,$$

где T — абсолютная температура, а $\sigma = 5,72 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек} \times \times \text{град}^{-4}$, называется *постоянной Стефана*. Эта формула получается интегрированием функции Планка по всем λ от 0 до ∞ .

Перечисленные законы излучения позволяют по положению максимума энергии в его спектре, по распределению энергии в спектре светила или по величине его полного излучения определить температуру абсолютно черного тела. Мы увидим дальше, что Солнце и звезды излучают энергию почти как абсолютно черное тело, и поэтому, применяя к ним эти законы, мы можем определить их температуры.

Широкое применение в астрофизике имеет известный принцип Доплера—Физо. При движении источника света относительно наблюдателя длины волн в его спектре изменяются согласно формуле:

$$\lambda_1 = \lambda \left(1 + \frac{v}{c} \right),$$

где λ — нормальная длина волны в спектре покоящегося относительно наблюдателя источника света, λ_1 — длина волны, измененная движением источника света относительно наблюдателя со скоростью v , а c — скорость света. В случае сближения тел скорость считается отрицательной. Принцип Допплера—Физо позволяет определять лучевую скорость¹ небесных светил, т. е. их скорость по лучу зрения. Сдвиг линий очень мал даже в спектрах небесных светил, движущихся крайне быстро.



А. А. Белопольский
(1870—1934)

Первое опытное подтверждение принципа Допплера—Физо принадлежит русскому астроному А. А. Белопольскому. При помощи остроумного прибора, построенного им, А. А. Белопольский создал в лаборатории источник света, движущийся со скоростью небесных тел, и подтвердил применимость принципа Допплера к свету. Начав свои работы по астроспектроскопии еще с 90-х годов XIX в. в Пулковской обсерватории и продолжая их вплоть до своей смерти уже в советское время, Белопольский сделал ряд выдающихся открытий в области переменных и спектрально-двойных звезд, исследования вращения планет, явлений на Солнце и др.

Некоторые смещения и видоизменения спектральных линий бывают вызваны и другими эффектами, помимо эффекта Допплера—Физо. Наиболее важным из таких эффектов для астрофизиков является эффект Зеемана. Эффект Зеемана состоит в том, что в спектре источника света, находящегося в магнитном поле, линии расщепляются. Если луч от источника света идет вдоль силовых линий магнитного поля, то спектральные линии в простейшем случае раздваиваются (превращаются в дуплеты), причем свет компонентов поляризован по кругу в противоположных направлениях. Если луч идет перпендикулярно к силовым линиям магнитного поля, спектральные линии расщепляются на три компонента (триплеты), причем свет боковых компонентов плоско поляризован поперек направления поля, а свет центральных линий поляризован вдоль направления поля. Величина расщепления, т. е. расстояние между компонентами расщепленной линии, пропорциональна напряженности поля.

¹ Иногда *лучевую* скорость неудачно называют *радиальной* скоростью.

§ 100. Спектральные приборы. Для визуального изучения спектров служат спектроскопы, а для фотографирования спектров — спектрографы. В астрофизике применяется преимущественно спектрограф с призмой. Спектрографы с дифракционной решеткой применяются реже, потому что в дифракционном спектрографе происходят большие потери света, а свет звезд и без того очень слабый. На рисунке 102 изображена схема спектрографа. Основными частями спектрографа являются: коллиматор (трубка K), призма (P) и фотографическая камера (R). Коллиматор представляет собой объектив O_1 , в главном фокусе которого установлена щель L . На щель наводят изображение исследуемого источника света, и, поскольку она установлена в главном фокусе объектива коллиматора, лучи, пройдя через объектив, падают на призму параллельным пучком, т. е. все они падают на нее под одинаковыми углами (под углом наименьшего отклонения призмы для середины спектра). Щель устанавливается параллельно преломляющему ребру призмы. Преломляясь в призме и отклоняясь от первоначального направления на различные углы, лучи попадают в объектив фотографической камеры O_2 , и на фотографической пластинке p получается фотография спектра. На фотографии все цвета спектра вызывают то или другое почернение, и поэтому спектрограмма (фотография спектра) не имеет вида цветной радужной полосы, как она видна непосредственно глазом.

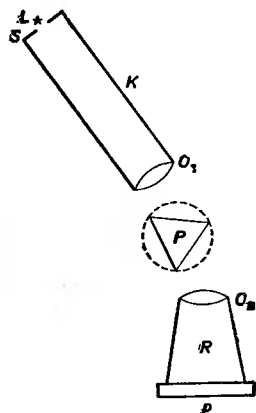


Рис. 102. Схема спектрографа

Спектроскоп отличается от спектрографа тем, что взамен фотографической камеры на ее месте устанавливается зрительная труба.

Линейная дисперсия спектрограммы, т. е. линейное расстояние между двумя данными линиями спектра, тем больше, чем больше преломляющий угол призмы, чем больше различие в показателях преломления этого вещества для этих длин волн и чем больше фокусное расстояние фотографической камеры. Для увеличения дисперсии применяются двух- и трехпризменные спектрографы. Спектрограф превращается к телескопу так, чтобы изображение небесного светила, подвергаемого изучению, приходилось как раз на щель спектрографа.

Так как небесные светила в большинстве случаев испускают очень слабый свет, то астрофизикам приходится довольствоваться небольшими дисперсиями, потому что чем больше дисперсия, тем дольше должна быть экспозиция. В некоторых случаях астрономам приходится применять для фотографирования спектров экспозиции, доходящие до сотен часов, причем такое фотографирование производится в течение ночей с перерывом на дневное время. Ма-

лость дисперсии астрономических спектрограмм заставляет измерять их с особенной тщательностью, и для определения длин волн спектральных линий положение их на фотографиях измеряется опять-таки с точностью до тысячных долей миллиметра.

Как известно, *спектральные линии являются изображениями щели коллиматора* и обычно имеют вид прямых линий потому, что щель делается прямой. Если щель сделать в форме серпа, то и спектральные линии получатся в форме серпа. Имея это в виду, нетрудно понять принцип действия так называемой объективной призмы — прибора, играющего большую роль в астрофизике.

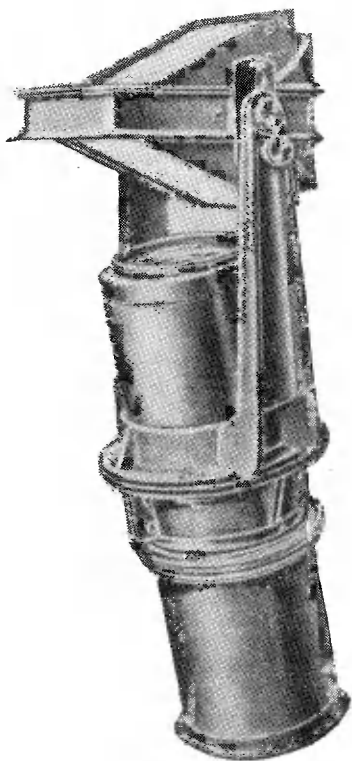


Рис. 103. Объективная призма

Объективная призма представляет собой фотографическую камеру, перед объективом которой установлена призма без коллиматора (рис. 103). Для звезд коллиматор, в сущности говоря, не нужен, потому что звезды находятся практически в бесконечности и их свет падает на призму уже параллельным пучком. Если небесное светило, которое мы хотим изучить, испускает монохроматическое (т. е. состоящее из отдельных длин волн) излучение и имеет, скажем, форму серпа, то, фотографируя его спектр объективной призмой, мы получим спектр, в котором линии будут иметь форму серпа, так как они будут представлять собой изображения данного небесного светила в монохроматических лучах. Если это светило дает спектр поглощения, то бесчисленное множество монохроматических изображений, налагаясь друг на друга, соби-

раются в сплошную светящуюся спектральную полосу, в которой линии поглощения, если даже они и есть, нельзя будет увидеть. Так как звезды представляются светящимися точками, то спектры их, полученные объективной призмой, имеют вид чрезвычайно тонкой нити, а спектральные линии в них имеют вид точек. Если фотографическая пластинка при фотографировании перемещается перпендикулярно к протяжению спектра, то такой «ниточный» спектр звезды растянется в полоску заметной ширины и темные спектральные линии в таком спектре поглощения станут отчетливо заметны как таковые. При фотографировании *объективной призмой* (называемой иначе призмной камерой) на пластинке одновременно получаются

спектры всех тех небесных светил, которые при помощи данной фотографической камеры могут быть сфотографированы непосредственно без призмы на той же пластинке (рис. 104).

Объективная призма имеет то огромное преимущество по сравнению со щелевым спектрографом, что она позволяет получить одновременно на одной пластинке фотографии спектра десятков и даже сотен звезд. Кроме того, потери света в призмной камере гораздо меньше, чем в щелевом спектрографе, где не весь свет звезды попадает в щель.

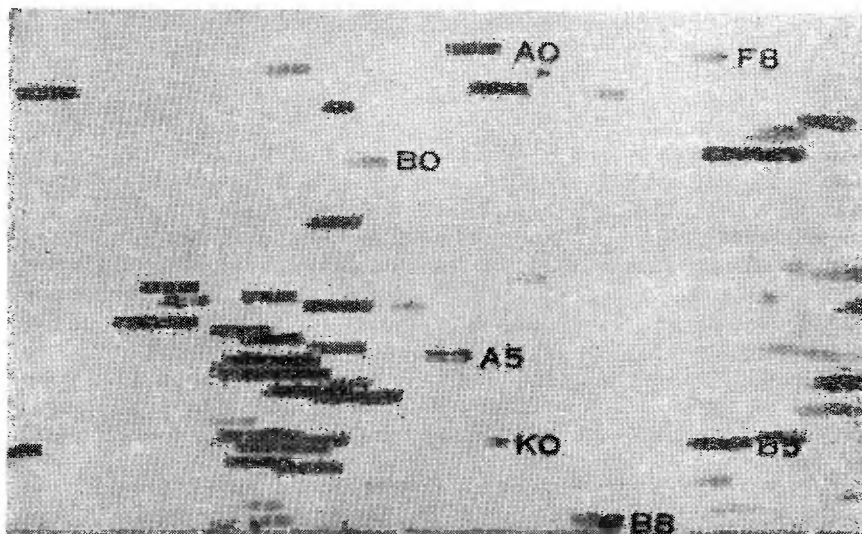


Рис. 104. Спектрограмма звезд (негатив), полученная объективной призмой

К сожалению, при помощи объективной призмы нельзя точно определять длины волн линий спектра и получать большую дисперсию и чистоту спектра.

§ 101. **Определение цвета и показателей цвета небесных светил.** Цвет всякого источника света часто служит указанием на распределение энергии в его спектре. Поэтому определение цвета небесных светил, которое сделать легче, чем исследовать распределение энергии в его спектре, может служить некоторой заменой спектрофотометрических измерений. Ввиду того что свет многих небесных объектов чрезвычайно слаб и анализировать его спектрально мы не можем, приходится довольствоваться определениями его цвета. В случае, если небесное светило излучает энергию в непрерывном спектре по закону Планка (как это имеет место приблизительно для Солнца и звезд), то теоретически, зная чувствительность глаза к лучам различной длины волны, можно вычислить связь между рас-

пределением энергии в спектре и цветом этого светила, как он воспринимается глазом. В частности, по цвету звезд, хотя и с меньшей точностью, можно установить их температуру.

Действительно, как можно видеть из законов излучения и как это известно из непосредственного опыта, по мере того как температура тела повышается, в его спектре к невидимым глазу инфракрасным (тепловым) лучам постепенно присоединяются красные, затем желтые, зеленые, фиолетовые и т. д. Попутно с этим тело меняет свой цвет сначала от черного к темно-красному, затем к ярко-красному, желто-красному, оранжевому и, наконец, достигает белого каления. По мере увеличения температуры тела максимум его энергии все более и более перемещается в сторону коротких длин волн.

Цвета планет и звезд весьма разнообразны, переходя от красного через желтый и белый к голубоватому. Словесные описания цвета весьма субъективны и неопределенны, и поэтому очень важно выражать цвет небесных светил к какой-либо количественной мере. Такой количественной мерой является показатель цвета.

Показателем цвета называется разность: фотографическая звездная величина объекта минус его визуальная звездная величина. Условились считать, что чисто белые звезды, принадлежащие к так называемому спектральному классу A0, имеют одинаковую звездную величину, как фотографическую, так и визуальную, т. е. для них показатель цвета условно принят равным нулю. На основании того, что фотопластинка чувствительна больше всего к фиолетовым лучам, а глаз к желтым, *показатель цвета алгебраически увеличивается по мере покраснения цвета объекта.*

Показатели цвета меняются приблизительно в пределах от $-0,4$ до $+6$ звездных величин. Показатель цвета абсолютно черного тела при бесконечно высокой температуре составляет $-0,64$. Отрицательный показатель цвета означает, что цвет светила голубоватый. Показателями цвета в астрофизике пользуются чрезвычайно широко.

§ 102. Теллурические линии и их исследование. Когда свет небесных светил проходит через атмосферу Земли, состоящую из различных газов, то последние производят добавочное поглощение света в сравнении с тем, какое имеет место в атмосфере самого изучаемого светила. При этом *в спектрах светил возникают темные линии, называемые теллурическими.* Это поглощение, производимое молекулами атмосферных газов, есть поглощение монохроматическое, вследствие чего по теллурическим линиям можно судить о химическом составе земной атмосферы. Однако заметные теллурические линии вызывают в спектрах небесных светил только те газы, которые находятся в атмосфере в достаточном количестве.

Наиболее сильные теллурические полосы поглощения дают водяной пар и озон, в меньшей степени — кислород. Водяной пар, всегда присутствующий в воздухе, создает поглощение преимущественно в красной и инфракрасной (тепловой) части спектра.

Озон O_3 , расположенный в атмосфере преимущественно на высотах от 16 до 32 км, дает сильную полосу поглощения в близкой ультрафиолетовой и в особенности в далекой ультрафиолетовой части спектра, практически поглощая все лучи с длиной волны короче 2900 Å. Вследствие этого спектры небесных светил за пределами λ 2900 Å недоступны наблюдению с поверхности Земли. Однако с ракет, поднимавшихся на высоту почти до 500 км (выше толщи воздуха, содержащей озон), удалось сфотографировать спектр Солнца до 1000 Å. Гораздо большие возможности представляет запуск искусственных спутников Земли.

Возникает вопрос: как же отделить темные линии, присущие спектру светил в действительности, от теллурических темных линий? К счастью, в наиболее часто и легко изучаемой части спектра (от близких ультрафиолетовых до красных лучей) теллурические линии почти отсутствуют. Выяснить же, какие линии спектра являются теллурическими и какие нет, можно так.

Во-первых, при движении небесного светила относительно наблюдателя все линии спектра согласно принципу Доплера—Физо смещаются, в то время как теллурические линии остаются неподвижными.

Во-вторых, если фотографировать спектр светила на различных зенитных расстояниях, то теллурические линии усиливаются по мере увеличения зенитного расстояния, т. е. по мере того как лучи пронизывают все большую толщу воздуха. Таким образом, астрофизики всегда с полной уверенностью определяют, какие линии относятся к спектру самого небесного светила.

§ 103. Определение качественного химического состава атмосфер и лучевых скоростей светил. Определение качественного химического состава атмосфер самосветящихся небесных светил, т. е. Солнца, звезд, комет и некоторых туманностей, состоит в отождествлении линий их спектров. Отождествление линий состоит в определении их длин волн и установлении того, каким химическим элементам принадлежат эти линии.

Для определения длин волн в спектре небесного светила, если применяется обычный призменный спектрограф, поступают следующим образом. При фотографировании спектра небесного светила края щели спектрографа закрываются диафрагмой. Затем закрывается диафрагмой середина щели, а края открываются и освещаются светом лабораторного источника света, служащего для получения спектра сравнения. В результате мы получаем на пластинке фотографию спектра небесного светила, а над и под ним — фотографию спектра источника сравнения (рис. 105). В качестве спектра сравнения обычно применяется спектр электрической дуги между железными электродами, дающий спектр излучения, богатый линиями по всей длине спектра. Длины волн линий спектра железа хорошо изучены в лаборатории. Астроному приходится лишь, основываясь на измерении положений линий спектра не-

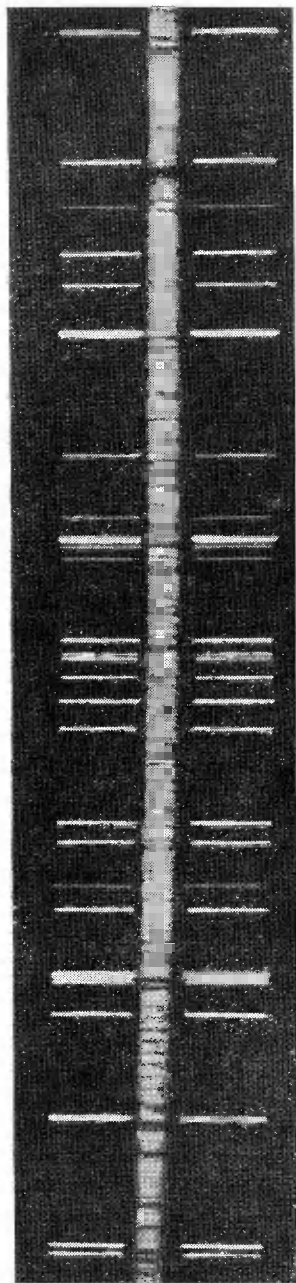


Рис. 105. Спектр звезды Прокцион. Сверху и снизу спектр железной дуги (спектр сравнения)

бесного светила по отношению к близким линиям спектра сравнения, определить их длины волн.

Некоторые химические элементы обладают чрезвычайно характерными спектрами, которые часто встречаются в спектрах звезд и которые бывает легко распознать с первого же взгляда без всяких измерений. Таковы, например, водородная серия Бальмера (рис. 106) и линии Н и К ионизированного кальция, располагающиеся в ультрафиолетовой части спектра.

Количественный химический анализ атмосфер небесных светил, т. е. определение числа атомов или молекул, содержащихся в единице их объема, производится на основании изучения тех же спектров, но уже путем интерпретации их с точки зрения теоретической физики и теории строения звездных атмосфер.

Скорость движения небесного светила по отношению к наблюдателю мы определяем на основании принципа Доплера—Физо. Если светило движется (как целое), то все линии его спектра согласно формуле, приведенной в § 99, должны быть смещены. Допустим, что, измерив длины волн спектральных линий по спектрограмме, как они наблюдаются, и сравнив их с длинами волн линий химических элементов, мы найдем, что совпадение было бы достигнуто, если бы длины волн всех наблюдаемых линий были изменены согласно формуле Доплера при одном и том же значении v . В этом случае мы можем, очевидно, произвести и определение химического состава небесного светила и по величине смещения линий определить его лучевую скорость.

При измерении скорости движения светила нужно помнить, что его наблюдаемая скорость меняется вследствие движения Земли по ее орбите

вокруг Солнца. Поэтому наблюдаемую скорость всегда исправляют за скорость движения Земли, или, как говорят, приводят к Солнцу. Очевидно, что если, например, в некоторый момент Земля приближается к звезде, несясь по своей орбите со скоростью 30 км/сек, то через полгода она будет удаляться от нее с такой же скоростью, хотя светило по отношению к Солнцу может в течение всего этого времени оставаться в покое.

§ 104. Радиометоды в астрономии. В сороковые годы нашего столетия возникла совершенно новая отрасль астрофизики, основанная на новейших достижениях радиотехники. Эта бурно развивающаяся отрасль, требующая участия высококвалифицированных радиоинженеров и радиофизиков, развивается в двух направлениях.

Возможность посылать почти без рассеяния направленный поток радиоволн при помощи радиолокатора позволила получить от-

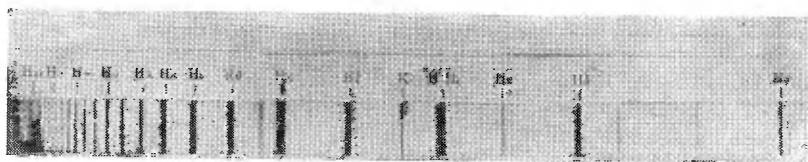


Рис. 106. Водородная серия Бальмера в спектре звезды

ражение радиоволн от поверхности Луны. Теория радиолокации Луны была разработана советскими академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси. При полете в земной атмосфере вторгающихся в нее мелких тел последние испаряются и производят явление «падающих звезд» (метеоров). Пары метеора и ионизированный воздух, образующие в атмосфере светящуюся полосу, отражают радиоволны. Это позволяет при помощи радиолокатора не только в ясные ночи, но и днем, притом даже и в пасмурную погоду, устанавливать появление метеоров, их высоту над поверхностью Земли и скорость их движения.

С другой стороны, стал возможен прием радиоизлучения небесных тел на ультракоротких волнах, пропускаемых земной атмосферой, что очень расширяет наши представления о происходящих в них процессах. Для такого радиоприема устанавливают радиотелескопы. Они бывают в основном двух типов. Радиотелескопы одного типа представляют собой огромное вогнутое металлическое зеркало, в фокусе которого сосредотачивается энергия радиоволн, падающих на зеркало (рис. 107). В фокусе помещается приемник радиации, небольшая приемная антенна, называемая облучателем. Последний соединяется с входными клеммами радиоприемника, настроенного на ту или иную длину волны и после усиления радиосигналов производящего их пишущий прием.

Так как радиоволны гораздо длиннее световых волн, а между изучаемыми длинами волн и потребной для их правильного собирания формой зеркала существует определенное соотношение, то зеркала радиотелескопов можно делать даже не сплошными, а решетчатыми, например из проволок или изогнутых брусьев

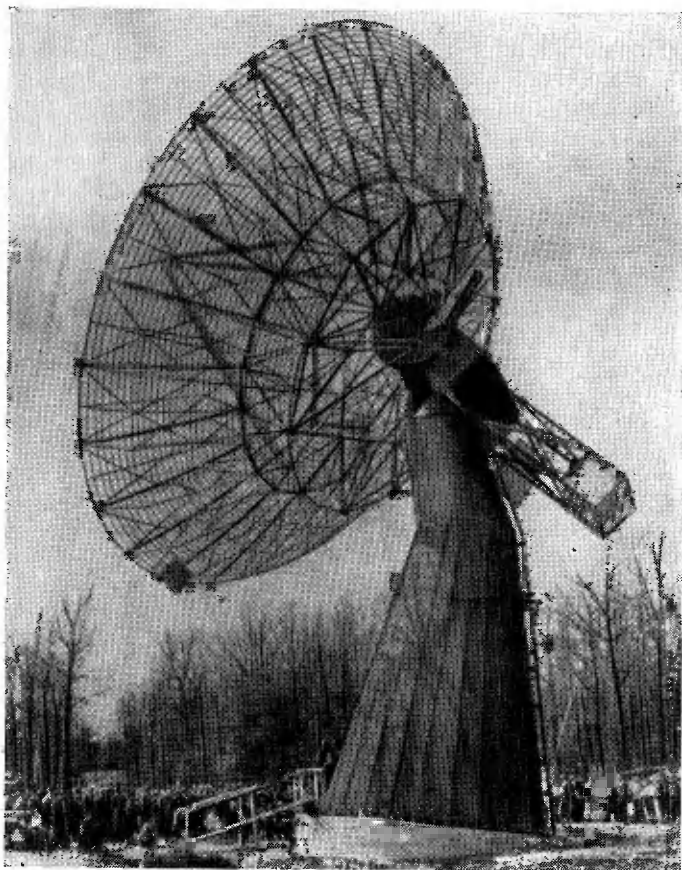


Рис. 107. Зеркальный радиотелескоп

и с гораздо меньшей точностью, чем зеркала оптических телескопов (рефлекторов). Поэтому удается делать радиотелескопы с гигантскими зеркалами в десятки метров диаметром.

Радиотелескопы другого типа представляют собой многодипольные антенны. Это ряд металлических стержней, длина которых равна половине длины волны изучаемых радиоизлучений (рис. 108). Токи, возбуждаемые в параллельных диполях, расположенных

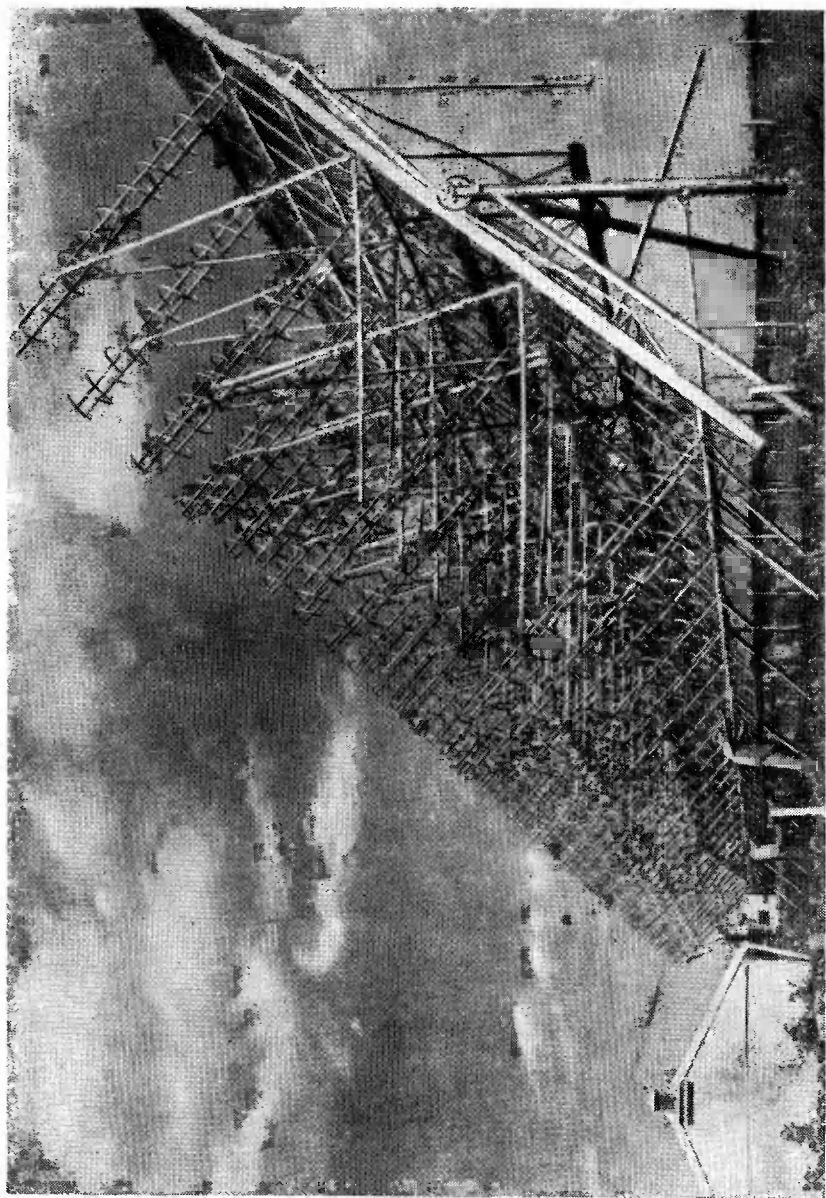


Рис. 108. Радиотелескоп с многодипольной антенной

в одной плоскости, складываются и мощность антенны зависит от ее площади. Существуют сложные комбинации зеркальных и многодиопольных приемников радиоизлучения.

§ 105. Давление света. Как это выяснено астрономическими исследованиями, в мировом пространстве чрезвычайно большую роль играет давление света, которое в явлениях природы на Земле проявляется лишь крайне незначительно.

Как известно из курса физики, Максвелл, пользуясь электромагнитной теорией света, пришел к заключению, что свет должен оказывать давление на тела, которые его поглощают или отражают. Если поверхность полностью поглощает падающую на нее лучистую энергию, то на элемент ее ds действует давление $dk = \eta ds$, где η — плотность энергии в данной точке.

Световое давление, вызываемое солнечными лучами на Земле, можно подсчитать так: на 1 см^2 земной поверхности, перпендикулярной к солнечным лучам, в течение 1 секунды падает энергия $1,4 \cdot 10^6$ эргов (учитывая поглощение в земной атмосфере). Так как свет распространяется со скоростью $3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$, то это количество энергии содержится в цилиндре с площадью сечения в 1 см^2 и высотой $3 \cdot 10^{10} \text{ см}$, так что η равняется $4,5 \cdot 10^{-5} \text{ эрг/см}^3$ и, следовательно, давление солнечного излучения на Земле составляет $4,5 \cdot 10^{-5} \text{ дин/см}^2$.

Давление света, являющееся следствием того, что свет обладает количеством движения, должно существовать не только с точки зрения электромагнитной, но и с точки зрения квантовой теории света. Экспериментальное существование давления света было установлено известным московским физиком П. Н. Лебедевым в 1900 г. Лебедев пропускал из одного сосуда в другой чрезвычайно легкие частицы, которые, будучи освещены сильным светом сбоку, падали не отвесно, а под давлением световых лучей при своем падении отклонялись в сторону. Давление света играет большую роль в объяснении образования кометных хвостов, строения туманностей и представляет важный фактор в недрах звезд, с чем мы более подробно познакомимся в следующих главах.

§ 106. Теория ионизации. Как известно из физики, газы, молекулы которых представляют собой химическое соединение, как, например, циан (CN_2), под действием нагревания могут диссоциироваться, т. е. распадаться на свои составные части.

В 1920 г. к процессам ионизации атомов с соответствующими изменениями была применена теория диссоциации молекул. Эта теория оказалась необычайно плодотворной для астрофизических исследований, и сейчас теория ионизации является основой всей современной астрофизики. Интерпретация звездных спектров с точки зрения теории ионизации чрезвычайно расширяет наши представления о физической природе звезд.

В теории ионизации исследуется, каким образом количество ионизированных атомов увеличивается по мере повышения температуры. По мере роста температуры процент ионизированных атомов становится все больше и больше, а следовательно, в спектре подобного газа мы должны наблюдать появление и постепенное усиление линий ионизированных атомов, в то время

как интенсивность линий нейтральных атомов, число которых постепенно уменьшается за счет ионизации, убывает. При некоторой температуре начинается в газе вторичная ионизация и появляются линии спектра дважды ионизированных атомов, по мере усиления которых линии однажды ионизированных атомов начинают ослабевать, а линии нейтральных атомов исчезают совершенно.

С другой стороны, степень ионизации зависит также от давления электронов, которое само зависит от плотности газа, т. е. от числа частиц на единицу объема. Ввиду этого нетрудно видеть, что чем меньше электронное давление, тем ниже температура, при которой достигается данная стадия ионизации, потому что при малом давлении реже происходит рекомбинация ионов с электронами.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ПЛАНЕТЫ И ИХ СПУТНИКИ

Большие планеты

§ 107. **Общий обзор строения планетной системы.** Две группы **больших планет**. Та система космических тел, которую обычно называют *солнечной*, или *планетной системой*, состоит из центрального тела — Солнца, являющегося динамическим центром всей системы; 9 известных нам больших планет — Меркурия, Венеры, Земли, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна и Плутона (рис. 109) и их спутников (известен 31 спутник), более 1800 известных малых планет, или астероидов, движущихся преимущественно между орбитами Марса и Юпитера, около 500 известных комет и, наконец, из бесчисленных метеорных тел.

В действительности комет и малых планет гораздо больше. Полагают, что число комет, входящих как постоянные члены в нашу солнечную систему, превосходит 100 000. Малых планет существует, вероятно, 50—100 тысяч и, может быть, есть большие планеты, более далекие, чем Плутон.

Большие планеты можно разделить на две резко различающиеся друг от друга группы (рис. 110).

1. *Планеты «земной группы»:* Меркурий, Венера, Земля и Марс. Эти планеты сравнительно невелики по своим размерам и массам. Они обладают большими плотностями и сравнительно медленно вращаются вокруг своих осей. Поверхности их твердые, а окружающие их атмосферы не очень плотны. Вероятно, к этой группе планет относятся и Плутон.

2. *Планеты-гиганты* — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Они отличаются действительно огромными, по сравнению с нашей Землей, размерами, большой массой, но малой плотностью, сравнительно быстрым вращением вокруг оси и отсутствием постоянных устойчивых деталей на их поверхностях. В телескопы мы видим только внешние поверхности облачных слоев, плавающих в их мощных атмосферах. Облачные слои на гигантских планетах обнаруживают тенденцию вытягиваться полосами, параллельными экваторам этих планет. Сатурн отличается от всех планет той особенностью, что вокруг него имеется система плоских колец.

Уже самые первые телескопические наблюдения позволили сделать некоторые заключения о форме планет и их размерах. После

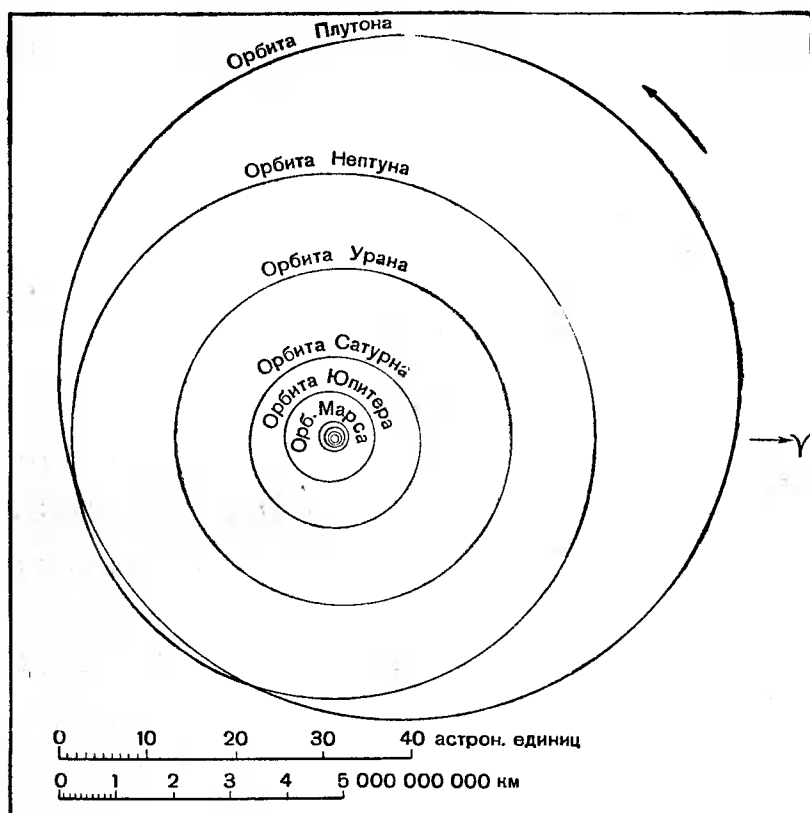


Рис. 109. Орбиты больших планет

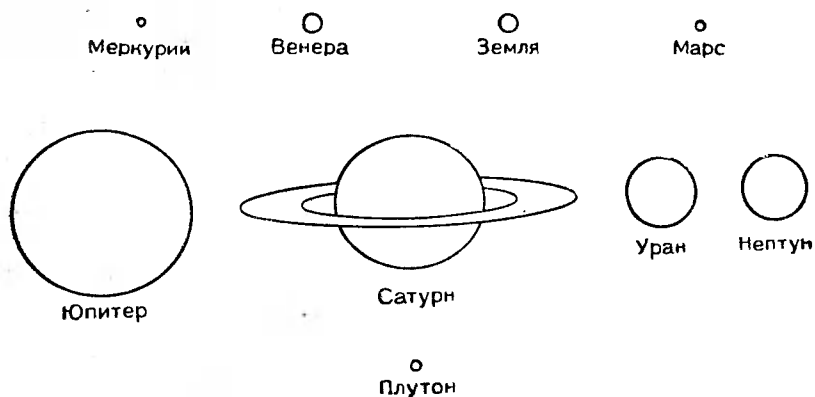


Рис. 110. Две группы больших планет

изобретения нитяного микрометра стало возможно достаточно точное определение угловых диаметров планет при наблюдении с Земли. Зная же угловой диаметр какой-либо планеты, по известному ее расстоянию от Земли легко вычислить диаметр этой планеты в линейных единицах.

У большинства больших планет заметно *сжатие* у полюсов так же, как и у нашей Земли. Для Земли это было установлено градусными измерениями и другими приемами, для Марса, Юпитера и Сатурна — найдено прямыми микрометрическими измерениями, а для Урана и Нептуна — теоретически из анализа движения их спутников.

Сжатием планеты называется величина

$$\varepsilon = \frac{a-b}{a},$$

где a — экваториальный диаметр планеты, а b — полярный ее диаметр.

Наибольшее сжатие имеется у планеты Сатурн ($1/10$), затем у Юпитера ($1/10$).

Сжатие Земли (как мы видели в главе V) выражается числом $1/298$.

Массы планет, имеющих спутников, определяются при помощи третьего, уточненного закона Кеплера (как это показано в гл. VI). Для планет, не имеющих спутников (Меркурий, Венера, Плутон), задача определения масс гораздо более трудна; она решается на основании анализа возмущений, производимых этими планетами в движении других планет (или комет). Массы Меркурия и Венеры определялись по возмущениям, производимым ими друг на друга, на Землю, на Марс, на комету Энке—Баклунда.

Зная массу и объем какой-либо планеты, можно найти ее среднюю плотность δ по формуле:

$$\delta = M : V.$$

Если за единицу масс принять массу Земли, а за единицу объемов — объем Земли, то плотность планеты δ получается по отношению к средней плотности Земли. Умножая же ее на $5,52 \text{ г/см}^3$ (средняя плотность Земли), получим среднюю плотность планеты в граммах на кубический сантиметр.

Наконец, можно вычислить ускорение силы тяжести g на поверхности планеты. Пусть r — радиус планеты, а m — ее масса; примем радиус и массу Земли за единицы, тогда g вычисляется по формуле:

$$g = g_0 \frac{m}{r^2},$$

где $g_0 = 9,8 \text{ м/сек}^2$ — ускорение силы тяжести на поверхности Земли. При этом не учитывается влияние вращения планеты.

В таблице 6 для выражения диаметров, объемов, масс, ускорения силы тяжести приняты за единицы величины их для Земли; средние плотности взяты по отношению к воде.

Периоды вращения Юпитера и Сатурна указаны экваториальные.

Таблица 6

Планета	Диаметр	Объем	Масса	Средняя плотность	Период вращения	Число спутников
Меркурий	0,4 ^с	0,07	0,04	3,8	88 ^д	—
Венера	0,99	0,97	0,82	4,7	?	—
Земля	1,00	1,00	1,00	5,5	23 ^ч 56 ^м	1
Марс	0,54	0,15	0,11	4,0	24 ^ч 37 ^м	2
Юпитер	11,26	1345	318	1,3	9 ^ч 50 ^м	12
Сатурн	9,45	760	95	0,7	10 ^ч 14 ^м	9
Уран	4,19	69	15	1,3	10 ^ч 49 ^м	5
Нептун	3,90	58	17	1,9	15 ^ч 36 ^м	2

§ 108. Меркурий обращается вокруг Солнца на среднем расстоянии в 58 млн. км. Полный оборот вокруг Солнца он совершает в 88 суток. Орбита Меркурия обладает значительным эксцентриситетом, составляющим почти 0,206. Поэтому его расстояние от Солнца изменяется в широких пределах от 46 до 70 млн. км.

Расстояние Меркурия от Земли меняется от 82 до 217 млн. км. Диаметр Меркурия составляет около 5 000 км. Средняя плотность Меркурия почти такая же, как у Луны, а сила тяжести на его поверхности примерно вчетверо меньше земной.

Наблюдать Меркурий очень трудно, потому что Меркурий никогда не отходит на небе от Солнца дальше чем на 18—28°. Простым глазом Меркурий можно наблюдать только при его наибольшем видимом удалении от Солнца — либо вечером, после захода Солнца, на фоне вечерней зари, либо утром, незадолго до солнечного восхода, на фоне рассвета. На небе, при благоприятных условиях, Меркурий представляется нам звездой 1-й величины.

В трубу видно, что Меркурий имеет фазы подобно Луне.

Измеряя яркость Меркурия в различных фазах, пришли к заключению, что он отражает солнечный свет почти так же, как Луна; отношение количества отраженного света к количеству упавшего света — так называемое альбедо — Меркурия составляет около 7% (так же, как у Луны).

Атмосфера Меркурия крайне разрежена. На это указывает изучение спектра планеты. Поверхностная температура на стороне Меркурия, обращенной к Солнцу, очень высока (около 400° С). Это является свидетельством того, что Меркурий обращен к Солнцу всегда одной и той же своей стороной (подобно тому, как наша Луна

всегда обращена одной и той же стороной к Земле). Следовательно, период вращения Меркурия вокруг оси равен периоду его обращения вокруг Солнца. Поэтому на одном полушарии Меркурия стоит вечный, нестерпимо жаркий день, а на другом — непомерно холодная вечная ночь. Особенность вращения Меркурия объясняется тем, что солнечные приливы вокруг своей оси тормозили его более быстрое вращение вокруг оси.

Масса Меркурия, не имеющего спутников, определена еще не точно. Среднюю плотность Меркурия принимают равной $3,8 \text{ г/см}^3$.

§ 109. Венера. Планету Венеру мы наблюдаем на нашем небе в виде блестящей вечерней или, наоборот, утренней звезды. Древ-

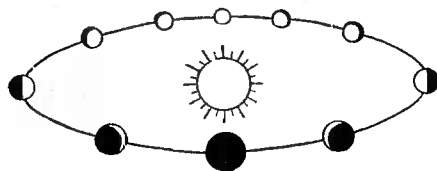


Рис. 111. Фазы Меркурия и Венеры

ние греки называли ее «Фосфором», а римляне «Люцифером», т. е. «светоносцем». Эта планета является ближайшей соседкой нашей Земли. При движении Венеры вокруг Солнца она становится видимой нам по вечерам после верхнего соединения с Солнцем, приближаясь к нам, а по утрам — после нижнего соединения, удаляясь от нас. Когда в нижнем соединении с Солнцем, то расстояние ее от нас бывает около 40 млн. км. К сожалению, в это время она обращена к нам своей неосвещенной стороной и поэтому не видна. Близ этого положения Венера представляется нам очень узким серпом. Чем дальше она от нас, тем шире, но зато и тем меньше в диаметре ее серп (рис. 112).

Среднее расстояние Венеры от Солнца равно 108 млн. км; орбита ее имеет наименьший в солнечной системе эксцентриситет ($e = 0,007$), т. е. она почти круговая. Период обращения планеты вокруг Солнца составляет около 225 дней. Так как Венера расположена ближе к

Солнцу, чем Земля, то она получает от него больше (в два с лишним раза) света и тепла по сравнению с нашей Землей. По своим размерам и массе Венера почти не отличается от Земли. Поэтому эту планету часто называют «близнецом» Земли. В самом деле, диаметр Венеры составляет 12 600 км, т. е. 0,99 диаметра Земли. Спутников у Венеры нет, поэтому массу ее определить очень трудно. Масса Венеры определялась, например, по некоторым возмущениям, производимым ею в движении Земли и Меркурия.

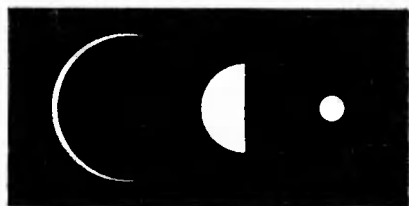


Рис. 112. Сравнительная величина Венеры в различных фазах

Солнцу, чем Земля, то она получает от него больше (в два с лишним раза) света и тепла по сравнению с нашей Землей. По своим размерам и массе Венера почти не отличается от Земли. Поэтому эту планету часто называют «близнецом» Земли. В самом деле, диаметр Венеры составляет 12 600 км, т. е. 0,99 диаметра Земли. Спутников у Венеры нет, поэтому массу ее определить очень трудно. Масса Венеры определялась, например, по некоторым возмущениям, производимым ею в движении Земли и Меркурия.

Венера на небе отходит от Солнца не дальше чем на $47-48^\circ$. Она блещет ярче всех звезд и планет. На светлом фоне вечерней или утренней зари она бросается в глаза. Наибольший блеск Венера в звездных величинах $-4,3$ (отрицательный). Она в 12 раз превосходит по блеску самую блестящую звезду на небе — Сириус. Такой большой блеск зависит от ее сравнительной близости к нам и от того, что Венера очень хорошо отражает свет Солнца. Альbedo Венеры составляет почти 59%, т. е. гораздо больше, чем альbedo Луны и Меркурия (7%). Венера примерно столь же бела, как наши земные облака. Стало быть, видимая нами поверхность Венеры должна быть совсем иной природы, чем поверхности Луны и Меркурия. Снимки, сделанные через ультрафиолетовый светофильтр при помощи крупнейших телескопов, лучше показывают светлые и темные пятна на диске планеты. Эти пятна чрезвычайно неясны, расплывчаты и непостоянны. Часто и вообще пятен на диске планеты совсем не видно. Светлые пятна — вероятно облака, темные — прорывы между облаками.



М. В. Ломоносов
(1711—1765)

О существовании плотной атмосферы у Венеры заключил еще в 1761 г. М. В. Ломоносов, наблюдая редкое явление прохождения Венеры по диску Солнца. М. В. Ломоносов опубликовал результаты своих наблюдений в статье «Явление Венеры на Солнце, наблюденное в Санктпетербургской. . . Академии наук мая 26 дня 1761 года». Он заметил, что при вступлении планеты на солнечный диск край Солнца сделался неясным, «а прежде был весьма чист и везде равен». Когда Венера приблизилась к другому солнечному краю на десятую долю своего диаметра, «появился на краю Солнца пупырь, который тем явственнее учинился, чем ближе Венера к выступлению приходила. Вскоре оный пупырь потерялся и Венера показалась вдруг без края. Полное выходение, или последнее прикосновение Венеры заднего края к Солнцу при самом выходе было также с некоторым отрывом и с неясностью солнечного края».

Многие астрономы наблюдали то же самое, о чем говорит в своем описании Ломоносов, но такого вывода, какой он сделал, никто из других наблюдателей сделать не смог; между тем: «По сим примечаниям господин советник Ломоносов рассуждает, что планета Венера окружена знатною воздушною атмосферою, таковою (лишь бы не большею), какова обливается около нашего шара земного» (М. В. Ломоносов, Полное собрание сочинений, т. IV, 1955, стр. 367—368) (рис. 113).

В атмосфере Венеры при самом тщательном исследовании ее спектра не было обнаружено ни кислорода, ни водяного пара. В инфракрасной части спектра планеты были открыты две широкие



Рис. 113. Прохождение Венеры по диску Солнца

линии поглощения углекислого газа, показывающие, что над облаками Венеры имеется такое количество углекислого газа, которое во много раз больше того, какое содержится в настоящее время в атмосфере Земли. Очевидно, на Венере происходило нечто подобное тому, что некогда происходило и на Земле; у нее была атмосфера из углекислого газа, водяного пара, азота, а также аргона, неона и незначительного количества других газов. Когда поверхность Венеры остыла до температуры, которая ниже точки кипения воды, значительная часть водяного пара должна была образовать океаны и моря. После этого в атмосфере Венеры остались

главным образом углекислый газ и, вероятно, азот. Последний обнаружен по ярким линиям в спектре ночного полушария Венеры, что говорит о наличии там мощных полярных сияний, линии которых характерны и для спектра земных полярных сияний, обусловленных действием корпускулярных потоков, влетающих в верхние слои атмосферы.

Если бы на Венере уже давно имелась мощная растительность, то в ее атмосфере должен был бы появиться свободный кислород. По-видимому, условия на Венере близки к тем, которые существовали на Земле, прежде чем на ней возникла жизнь.

Изучение фотоснимков Венеры приводит к заключению, что период вращения ее во всяком случае не меньше нескольких земных суток. При помощи термоэлемента на темном, неосвещенном полушарии Венеры была измерена температура -23°C . Это показывает, что Венера не может быть обращена к Солнцу всегда одной своей стороной. Иначе ночное ее полушарие было бы холоднее.

§ 110. Марс дальше от Солнца, чем Земля, примерно в полтора раза. Эксцентриситет орбиты Марса сравнительно большой ($e = 0,093$), и расстояние Марса от Солнца может меняться в довольно широких пределах: от 206,5 до 249 млн. км. Марс получает от Солнца света и тепла от 36% до 52% по сравнению с Землей. Расстояние Марса от Земли изменяется от 400 до 55,5 млн. км. Ближе к Земле Марс бывает в противостоянии. Это положение



Марс (по рисунку Антониади).

его повторяется примерно через два года. В это время Марс удобнее всего наблюдать. Через каждые 15 или 17 лет Марс бывает в так называемом *великом противостоянии*, т. е. он оказывается одновременно и в противостоянии, и близ перигелия своей орбиты и, следовательно, особенно близко подходит к Земле. Последние великие противостояния Марса происходили в 1877, 1892, 1909, 1924, 1939 и 1956 гг. (рис. 114). Следующее великое противостояние Марса произойдет в 1971 г.

Марс по своим размерам меньше Земли. Его диаметр несколько больше половины земного, объем примерно равен $\frac{1}{6}$ объема Земли, масса — около $\frac{1}{9}$ земной. Средняя плотность Марса в четыре раза больше плотности воды. Сила тяжести на Марсе составляет почти 37% силы земной тяжести. Период вращения Марса вокруг оси определен чрезвычайно точно: он равен $24^{\circ}37'22''.58$; марсианские сутки лишь очень немногим длиннее земных. Наклон оси Марса к плоскости его орбиты почти такой же, как и у Земли. Стало быть, смена времен года на Марсе и условия освещения в разные сезоны примерно такие же, как и у нас на Земле. «Год» Марса почти вдвое длиннее земного.

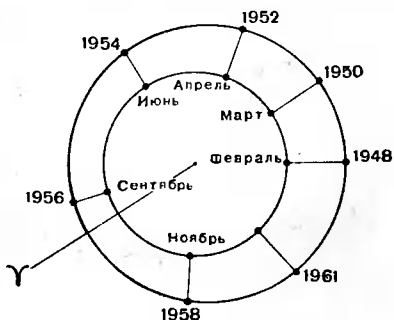


Рис. 114. Орбиты Земли и Марса и положения его противостояний

Орбита Марса вытянута сильнее, чем у Земли. В силу этого и различие в продолжительности времен года там выражено гораздо резче, чем на Земле. Масса Марса известна достаточно хорошо, так как у планеты открыто два спутника. Согласно микрометрическим измерениям, а также измерениям фотографических снимков, было определено достаточно уверенно и сжатие Марса. Оно оказалось равным $\frac{1}{190}$.

В XIX в. установилась особая номенклатура для различных пятен, наблюдающихся на диске Марса. Белые пятна на полюсах планеты получили название *полярных шапок*. Темные, сероватостального оттенка или зеленые пятна стали называться «морями», а красноватые, алые, желтоватые или опаловые пятна — «материками». Белые пятна на полюсах видны уже в небольшие трубы. Они периодически изменяют свои размеры в зависимости от смены времен года. Когда на каком-нибудь полушарии планеты приближается лето, полярные шапки постепенно уменьшаются: они «тают». Наоборот, зимой полярные шапки разрастаются до 3—4 тыс. км в поперечнике (рис. 115).

Обратимся теперь к общему виду поверхности Марса (таблица I). Большая часть (около $\frac{5}{6}$) поверхности Марса занята обширными светлыми красноватыми пространствами. Именно в силу этого обстоятельства Марс во время великих его противостояний, когда

он находится близко к Земле, кажется невооруженному глазу яркой огненно-красной звездой. Многие исследователи Марса приходили к заключению, что эти красноватые площади на диске Марса по своей природе близки к нашим земным пустыням. Поверхность Марса должна быть гладкой, ровной, покрытой мелкой пылью, похожей не лессовую.

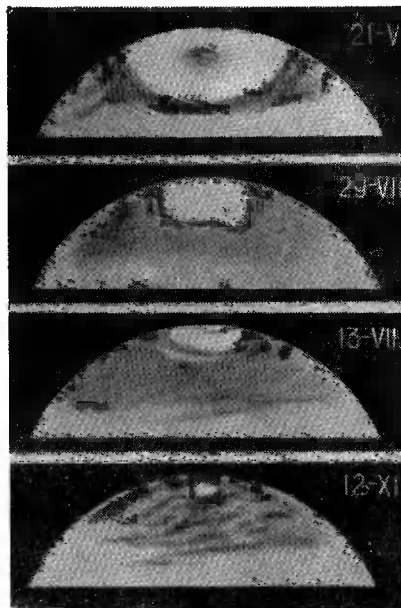


Рис. 115. Марс, темные пятна, белая полярная шапка и ее таяние

Марсианские «моря» тоже обнаруживают изменения окраски при смене времен года, как если бы эти места на Марсе были покрыты какой-нибудь растительностью. Многие астрономы указывали, что в период наибольшего потемнения марсианские «моря» имеют зеленую окраску, очень похожую на цвет земных растений. Изменение окраски различных деталей на Марсе, особенно темных пятен на его диске, несомненно, существует. Оно связано со сменой времен года и, может быть, вызывается изменением цвета растительного покрова, т. е. флоры, существующей на Марсе.

Для выяснения вопроса о растительности на Марсе представляют интерес работы советского астрофизика Г. А. Тихова. Мысль о существовании «земноподобной» растительности на Марсе встречала трудности, которые долгое время не удавалось преодолеть.

Одна из этих трудностей состоит в том, что зелень земных растений очень сильно рассеивает инфракрасные лучи, тогда как те места на Марсе, на которых предполагаются растительные покровы, не обнаруживают этого свойства. Далее, спектр земной зелени характеризуется широкой темной полосой в крайних красных лучах — полосой поглощения хлорофилла, которая в спектре Марса не обнаружена. Остается предположить, что путем длительного приспособления к условиям марсианского климата растительность этой планеты приобрела свойства, отличные от обычных свойств земной флоры. Для проверки этого предположения Г. А. Тихов изучил оптические особенности земных растений, живущих в суровых условиях высоких гор, т. е. в температурных условиях, приближающихся к климату Марса. Ему удалось установить, что отражательная способность земных растений в инфракрасных лучах, приносящих около половины всего солнечного тепла, оказы-

вается тем меньше, чем суровее климат. Так, например, для вечно-зеленой ели она в три с лишним раза меньше, чем для березы, несущей свой зеленый покров только в теплое время года. Можно допускать, что марсианские растения под влиянием сурового климата своей планеты полностью утратили способность рассеивать инфракрасные лучи.

Поэтому отсутствие линий хлорофилла в спектре Марса не может считаться бесспорным аргументом против существования растительности на этой планете.

§ 111. Атмосфера и климат на Марсе. Следующие факты свидетельствуют о существовании атмосферы на Марсе: 1) таяние полярных шапок; 2) явление сумерек; 3) то, что края диска планеты кажутся ярче, чем середина, и то, что детали поверхности у краев планеты представляются размытыми и неясными; 4) многократные наблюдения появления облаков и туманов на Марсе. О том же свидетельствуют и спектральные наблюдения. Теоретические исследования, основанные на рассеянии света атмосферой Марса, привели к тому заключению, что атмосферное давление на Марсе составляет от 100 до 200 мм.

Таким образом, земные люди, попав на Марс, чувствовали бы себя примерно так же, как на высоте около 20 км над Землей. Состав марсианской атмосферы в точности не установлен. Следов водяного пара и кислорода в атмосфере Марса по спектру пока не обнаружено, так как их там мало. Одновременно с этим в атмосфере Марса обнаружено значительное количество углекислого газа.

Вопрос о климате Марса связан с вопросом о температуре на его поверхности. При помощи особо чувствительного термозлемента была измерена температура в различных местах планетного диска. Расчеты, приводящие к наиболее высоким значениям температуры, дали следующие результаты. На экваторе Марса около полудня температура составляла от 5° до 20° С. К наступлению ночи температура падала ниже 0° . Ночью температура еще понижалась и к рассвету доходила до -46° С. Зимой в окрестностях южного полюса температура была порядка -60° С. Летом в том же месте температура доходила до $+10^{\circ}$ и до $+15^{\circ}$ С. Как раз в это время усиленно таяла южная полярная шапка. «Моря» оказывались при этом слегка теплее материков. Климат Марса значительно суровее, чем на Земле. Сильные зимние морозы и сравнительно теплое лето Марса в общем напоминают климатические условия земной тундры. Большое различие между температурой дня и ночи на Марсе напоминает наши земные условия на высокогорных равнинах и плоскогорьях. Сухая и разреженная атмосфера, бедная облаками, позволяет в течение дня сильно нагреваться почве. Ночью песчаные пустынные места быстро отдают свое тепло в межпланетное пространство, и даже в экваториальной зоне может быть очень холодно. Из земных растений очень немногие могли бы выдержать подобный тепловой режим.

Воды на Марсе мало. Полярные шапки, состоящие, по-видимому, из тончайшего слоя снега и окутывающего его тумана, дают слишком мало воды. На photographиях Марса часто замечались местные помутнения атмосферы, нечто вроде легкого тумана. Белые облака (вроде земных кучевых) появляются в марсианской атмосфере весьма редко. Некоторые облака на Марсе желтые и, вероятно, состоят из пыли.

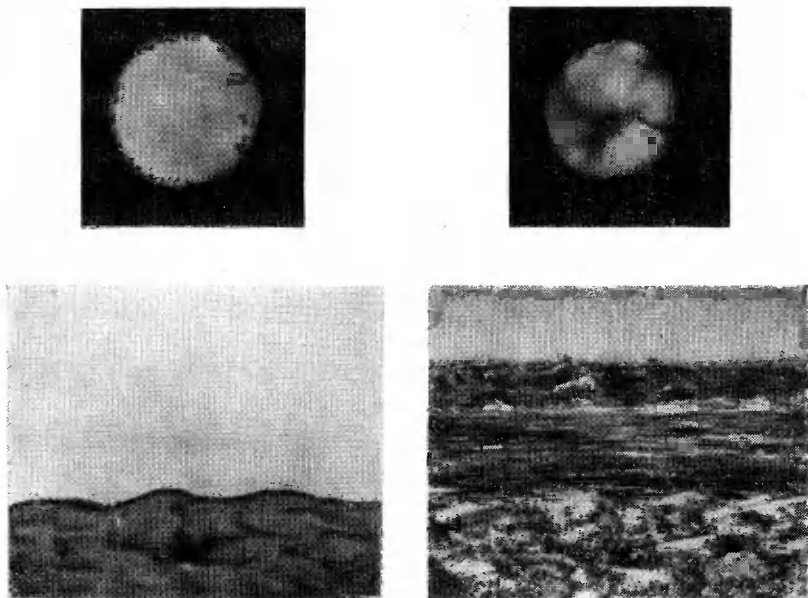


Рис. 116. Фотографии Марса и земного ландшафта. Левые снимки сделаны в фиолетовых лучах, а правые в инфракрасных

Сезонная смена окраски темных областей на Марсе ясно свидетельствует о том, что эту смену проще всего объяснить существованием какой-то засухоустойчивой растительности, способной выдерживать сильные морозы. Во всяком случае нет оснований считать планету Марс безжизненной, холодной пустыней. Можно предположить, что растения Марса в течение многих тысячелетий своего существования на этой планете постепенно приспособились к ее сухому и суровому климату, как это имеет место в суровых климатических условиях на Земле.

§ 112. Каналы Марса. В 1877 г., когда Марс находился в великом противостоянии, итальянский астроном Скиапарелли обнаружил, что «материки» планеты покрыты сетью темных узких прямых линий (рис. 117). Он назвал их *каналами*, т. е. по-итальянски — проливами, так как эти линии соединяли темные марсианские

«моря» друг с другом. Следовательно, «каналы» — такой же чисто условный термин, как «моря» и «материки».

Относительно каналов на Марсе возник спор. В то время как одни видели в каналах доказательство существования на Марсе разумных существ — марсиан, другие астрономы не верили в реальность каналов и считали их просто оптической иллюзией, тем более что в большие инструменты, когда атмосфера была спокойна, многие наблюдатели никакой сети каналов не видели. В великое противостояние 1924 г. крупнейшие каналы были сфотографированы. Фотоснимки каналов дают возможность судить и о сезонных изменениях, происходящих в каналах.

Фотоснимки Марса, полученные Г. А. Тиховым через различные светофильтры при помощи 30-дюймового рефрактора Пулковской обсерватории еще в 1909 г. во время великого противостояния планеты, создали новое направление в исследованиях Марса. В итоге их можно было с некоторой долей вероятности приписать изменение цвета многих темных областей на Марсе, его озер и каналов появлению на поверхности планеты зеленой растительности. Окончательно природа каналов

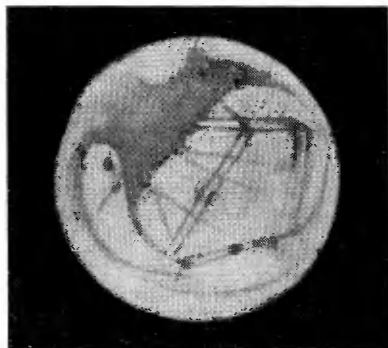


Рис. 117. Марс по рисунку Скиапарелли

Марса до сих пор не выяснена. «Каналы» не могут служить доказательством жизни на Марсе, так как не ясно, что они собой представляют. Едва ли их можно принять за ирригационные сооружения «марсиан». Они могут быть, например, совершенно естественными образованиями, вроде трещин или линий разлома в коре Марса, так как их геометрическая правильность и многочисленность не подтвердились.

Подводя итоги, можно сказать следующее: исчерпывающих доказательств существования на Марсе растений, а тем более жителей с высокоразвитой техникой нет, но есть доводы в пользу существования на Марсе растительности.

§ 113. Планеты-гиганты солнечной системы. Юпитер. Планеты Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун получили название гигантских по своим огромным размерам сравнительно с Землей. Наиболее массивной из планет является Юпитер; его масса равна $\frac{1}{1047,5}$

солнечной, или в 318 раз больше земной, а объем в 1300 с лишком раз больше земного. Отсюда видно, что средняя плотность его почти в четыре раза меньше земной. Планеты Уран и Нептун очень сходны по своим размерам, массе, плотности и всем другим своим особен-

ностям. В самом деле, массы их в 15 и 17 раз больше земной, диаметры — в 4,2 и 3,9 раза больше земного. Особенно выделяется своей малой плотностью Сатурн. Его масса в 95 раз больше земной, а объем — в 760 раз больше земного, так что средняя плотность его только 0,7 по отношению к воде.

Планет Урана и Нептуна древние не знали: Уран был открыт В. Гершелем в 1781 г., а Нептун — на основании теоретических исследований Леверье в 1846 г.

В XIX в. на поверхности Юпитера были открыты изменяющиеся полосы, параллельные экватору планеты, которые были признаны затем облаками (рис 118). Такие же пятна открыты были на Са-

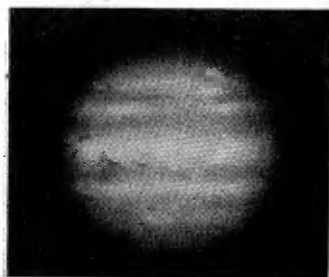


Рис. 118. Юпитер
(по фотографии)

турне (рис. 119). Однако на Юпитере известны и устойчивые образования. Одно из таких образований — большое «красное пятно». С 1882 г. оно начало тускнеть и теперь почти потеряло свой прежний цвет. «Красное пятно» имеет вид овала с большой осью, почти в 48 тыс км, параллельной экватору планеты.

В спектрах всех четырех планет-гигантов открыты резкие полосы поглощения в оранжевой и красной частях. У Сатурна эти полосы заметнее, чем в спектре Юпитера, в спектре Урана они значительно интенсивнее, а в спектре Нептуна еще интенсив-

нее. При высокой дисперсии спектрографа эти полосы разрешаются на множество тонких линий. В настоящее время известно, что эти линии и полосы принадлежат аммиаку и метану. Линии метана более интенсивны у Сатурна, чем у Юпитера.

Облака, образующие видимую поверхность Юпитера, могут, вероятно, в значительной степени состоять из капелек конденсированного аммиака. Метан (болотный газ CH_4) и аммиак (NH_3) кипят при нормальном давлении, если температура достигает -165°C . Так как атмосфера Юпитера, судя по измерениям, сделанным при помощи термоэлемента, очень холодная (в среднем температура -100°C или даже -140°C), то понятно, что в такой холодной атмосфере могут находиться только вещества, кипящие при очень низких температурах (значительно ниже 0°C).

Юпитер очень быстро вращается вокруг оси. Но он вращается не как твердое тело, а «по зонам», т. е. каждая зона вращается со своей собственной скоростью. Всего быстрее вращается экваториальная зона, а именно с периодом в $9^{\text{ч}}50^{\text{м}}$. Для разных широт Юпитера периоды вращения несколько отличаются и к полюсам доходят до $9^{\text{ч}}55^{\text{м}}$. Ось вращения Юпитера расположена почти перпендикулярно к плоскости его орбиты, так что смены времен года на этой гигантской планете, можно сказать, не происходит.

Поверхность Юпитера и других планет-гигантов, лежащая под облаками, нам невидима, и надежных данных о характере этих поверхностей и о внутреннем состоянии планет-гигантов нет. Наиболее вероятно, судя по низкой температуре атмосфер, что под облачным покровом каждой из этих планет лежит мощный слой льда и замерзших газов, а во внутренней части — твердое ядро.

Вычисляемая малая средняя плотность планет-гигантов может быть объяснена так. Эту плотность мы получаем делением их массы на их видимый объем. Но видимый объем определяется грани-

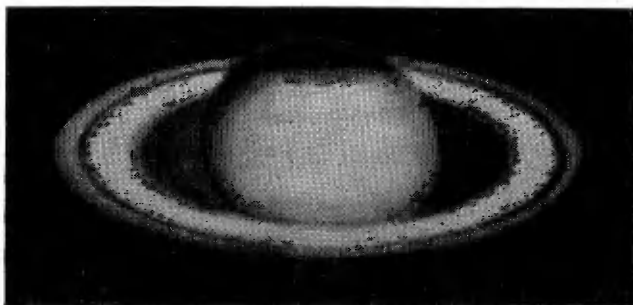


Рис. 119. Сатурн (по фотографии)

цей прозрачности необычайно обширных и высоких атмосфер этих планет. Во-первых, значительная часть этого объема заполнена, следовательно, газами атмосферы. Объем же «ядра» планет много меньше, чем видимый объем. Во-вторых, в состав этих планет входит много водорода — самого легкого из химических элементов.

§ 114. Сатурн. У Сатурна полосы облаков заметны хуже. Судя по наблюдениям, цвет их преимущественно коричневый; экваториальная область между ними желтоватая, тогда как на Юпитере экваториальная область беловатая. По своим размерам Сатурн является второй планетой после Юпитера. Вид планеты в телескоп (рис. 119), температура, альбеда — все это свидетельствует о том, что физическое строение обеих планет почти одинаково. Даже в очень сильные телескопы на Сатурне очень редко бывают видны отдельные пятна. По перемещению этих пятен удалось определить период вращения Сатурна вокруг его оси, оказавшийся равным от 10^h14^m до 10^h38^m : различные зоны вращаются с неодинаковыми угловыми скоростями. Ось вращения Сатурна отклонена от перпендикуляра к плоскости орбиты на 27° , следовательно, на Сатурне происходит смена времен года.

Главную особенность планеты Сатурн представляет кольцо — исключительное образование во всей планетной системе. Еще Галлеи заметил, но не мог разгадать причину необычного вида Сатурна.

Кольцо впервые рассмотрел Гюйгенс (в 1658 г.) в свой более совершенный телескоп. Он увидел, что кольцо не касается планеты,

а отстоит от шара планеты в ее экваториальной плоскости на некотором расстоянии. Размеры кольца огромны: радиус внешнего края кольца составляет 2,3 радиуса планеты, или 137 500 км. Вместе с тем кольцо необычайно тонко — не более 15—20 км толщиной. Когда кольцо поворачивается (при обращении планеты вокруг Солнца) к Земле ребром, оно вследствие своей тонкости перестает быть видимо даже в самые сильные телескопы, так что Сатурн в это время виден без кольца (рис. 120). Сатурново кольцо — образование весьма сложное. В самые сильные телескопы можно различить три концентрических кольца, окружающих планету: 1) внешнее, 2) среднее — самое яркое, 3) внутреннее, ближайшее к планете, очень слабое, иногда называемое креповым. Размеры их следующие:

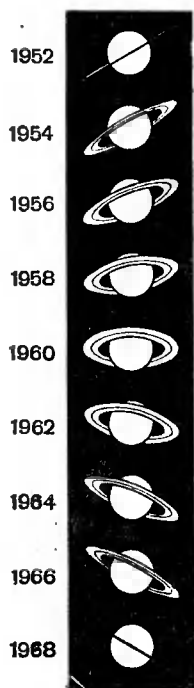


Рис. 120. Изменяющиеся виды колец Сатурна

	В экв. диаметрах планеты	В км
Внешний диаметр кольца 1 . . .	2,310	278 600
Середина деления Кассини . . .	1,985	239 400
Внутренний диаметр кольца 2 . .	1,481	178 500
» » » 3 . .	1,194	144 000

Академиком А. А. Белопольским, измерившим ряд спектрограмм кольца, полученных на Пулковской обсерватории с 30-дюймовым рефрактором, а также Килером в США и Деландром во Франции было доказано, что все три кольца имеют метеоритное строение. На основании доплеровского смещения было выяснено, что скорость на внутреннем крае кольца составляет 21,1 км/сек, тогда как на внешнем крае она равна только 15,5 км/сек (рис. 121).

Скорости эти те же самые, какие получились бы, если бы мы вычислили скорости двух воображаемых спутников, находящихся на таком же расстоянии от планеты, на каком находятся внутренний и внешний края кольца. Таким образом, кольцо — не твердое тело, а состоит из отдельных невидимых спутников, движущихся по третьему закону Кеплера. Прозрачность колец доказана наблюдениями прохождения позади них звезды, которая была отчетливо видима. Н. П. Барабашев из своих исследований фотоснимков колец сделал вывод, что креповое кольцо простирается до самой поверхности Сатурна. Относительно внешнего и крепового колец сделан вывод, что размеры наиболее мелких частиц, составляющих эти кольца, соизмеримы с длиной световой волны, т. е. составляют несколько десятых долей микрона, частицы среднего кольца крупнее, диаметры их измеряются сантиметрами и десятками сантиметров.

Между внешним и средним кольцами находится промежуток шириной почти в 5 000 км. Он называется делением Кассини. В сильные телескопы усматриваются и другие «деления», трудно различимые. Массу колец Сатурна оценивают в $\frac{1}{27000}$ долю массы Сатурна, т. е. примерно около $\frac{1}{4}$ массы Луны.

Теоретическое исследование об устойчивости сатурновых колец было выполнено еще во второй половине XIX в. русским математиком С. В. Ковалевской.

§ 115. **Уран, Нептун и Плутон.** На зеленоватых дисках Урана и Нептуна нельзя различить почти никаких деталей, никаких пятен. Ось вращения Урана составляет с перпендикуляром к пло-

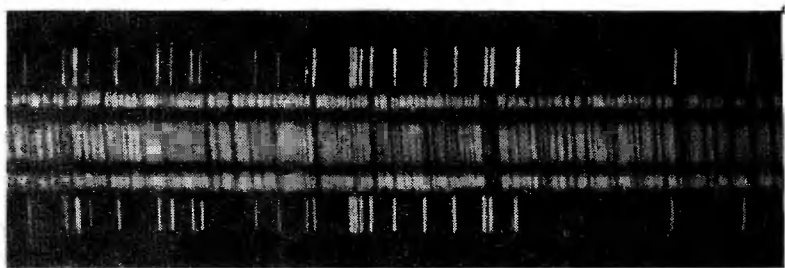


Рис. 121. Спектрограмма Сатурна и его колец

скости его орбиты угол почти в 87° . Это вызывает очень странное, единственное в солнечной системе явление: Уран обращается вокруг Солнца все время почти «лежа на боку». Это обуславливает весьма причудливую смену времен года. «День» и «ночь» могут продолжаться по нескольку лет. Период вращения Урана вокруг оси равен $10^{\text{ч}}49^{\text{м}}$ (определен и визуально, и по спектральным наблюдениям). Спектр Урана похож на спектры Юпитера и Сатурна. Аммиак там почти весь вымерз, а полосы метана в его спектре очень интенсивны.

Равным образом и на планете Нептун никаких деталей и пятен тоже различить нельзя. Однако вращение вокруг оси его установлено по спектру, и период его равен приблизительно 16. В спектре Нептуна тоже особенно интенсивна полоса метана. Аммиак на Нептуне весь вымерз.

Плутон открыт в 1930 г., и лишь недавно достаточно хорошо была определена его орбита. Масса его, по последним определениям почти равна массе Земли. Орбита у Плутона имеет очень большой эксцентриситет, равный 0,247, и наклонение орбиты, равное $17^\circ,3$. О Плуtone, на котором Солнце показалось бы нам совсем негаснущей звездой, нам пока известно очень мало. Его среднее расстояние от Солнца равно 39,5 астрономической единицы, а период обращения вокруг Солнца равен 248 годам.

Спутники планет. Луна

§ 116. Размеры, масса и плотность Луны. Вращение вокруг оси. Никакой другой спутник в солнечной системе не имеет такой большой величины по сравнению со своей планетой, как Луна — единственный спутник Земли. Угловой радиус Луны при ее среднем расстоянии от Земли равен $15'32''{,}58$, что соответствует линейному ее диаметру, равному 0,27 земного диаметра, или 3476 км.

Объем Луны равен $\frac{1}{49}$ объема Земли; поверхность ее составляет $\frac{1}{14}$ земной поверхности.

Согласно новейшим определениям средняя плотность Луны равна $0,6043 \pm 0,0003$ плотности Земли, или $3,33 \pm 0,01$ плотности воды. Это почти в точности соответствует плотности базальтовых пород. Сила тяжести на Луне примерно в шесть раз меньше, чем на Земле.

Во всех фазах на поверхности Луны мы всегда видим невооруженным глазом одни и те же пятна, расположенные одинаково относительно краев лунного диска. Это значит, что Луна обращена к нам всегда одной и той

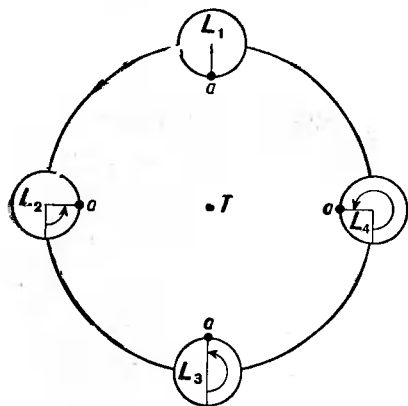


Рис. 122. Объяснение вращения Луны вокруг своей оси

же своей стороной, или, говоря иначе, одним и тем же своим полушарием. Отсюда как простое следствие вытекает, что Луна вращается вокруг своей оси с тем же периодом, с каким она обращается и вокруг Земли (в $27\frac{1}{3}$ суток). Это ясно из рисунка 122. Пятно *a* на этом рисунке всегда видно на середине диска Луны; это может быть только в том случае, если Луна по мере своего движения вокруг Земли поворачивается соответственно и около своей оси: сначала на 90° , затем на 180° , 270° и, наконец, на все 360° .

В отношении вращения Луны вокруг оси могут быть сформулированы следующие положения, выведенные из наблюдений: 1) Луна вращается вокруг оси, наклоненной под постоянным углом к плоскости эклиптики ($88^\circ28'$), вращение это происходит равномерно, причем период его в точности равен периоду среднего обращения Луны вокруг Земли; 2) три плоскости — лунного экватора, орбиты Луны и эклиптики — пересекаются по одной прямой, причем плоскость эклиптики лежит между плоскостями лунного экватора и орбиты Луны.

С плоскостью лунного экватора плоскость эклиптики образует угол в $1^\circ32'$, а с плоскостью лунной орбиты — угол в $5^\circ9'$. В сумме это дает $6^\circ41'$. Следовательно, ось вращения Луны образует с плоскостью ее орбиты угол в $83^\circ19'$.

§ 117. **Либрация Луны.** Тщательно наблюдая Луну изо дня в день в телескоп даже средней силы, можно заметить, что Луна как бы медленно качается, показывая нам в общем несколько больше половины своей поверхности. Это явление получило название лунной либрации.

Либрация бывает трех главнейших видов: 1) суточная, или параллактическая; 2) либрация по широте; 3) либрация по долготе.

Суточная, или параллактическая, либрация проявляется в том, что пятно, которое было видно посередине диска Луны при ее восходе, уже не будет лежать в точности посередине диска, когда Луна стоит высоко над горизонтом или заходит. Суточная либрация происходит оттого, что наблюдатель вследствие суточного вращения

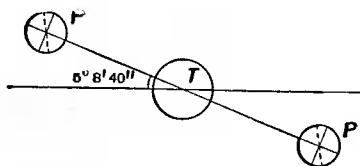


Рис. 123. Либрация по широте

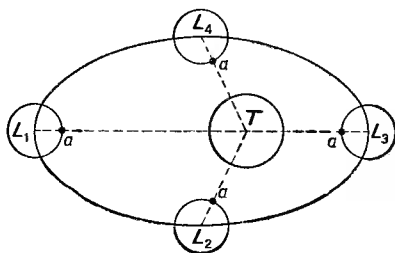


Рис. 124. Либрация по долготе

Земли занимает различные положения в пространстве относительно линии, соединяющей центры Земли и Луны.

Либрация по широте возникает от наклонения оси Луны к ее орбите (рис. 123). Ось вращения Луны наклонена к плоскости ее орбиты под углом в $83^{\circ}19'$ и движется в пространстве параллельно самой себе. В силу этого мы с Земли будем видеть попеременно то области, расположенные около южного полюса Луны, то, наоборот, области, прилегающие к северному полюсу Луны. Либрация по широте вызывает видимое смещение центра лунного диска по широте.

Либрация по долготе является самой значительной. Она происходит оттого, что вращение Луны вокруг оси ее совершается равномерно, а движение самой Луны по ее орбите, напротив, неравномерно, согласно законам Кеплера (рис. 124). Угол, определяющий положение Луны на орбите (угол между радиусом-вектором и большой осью), возрастает не пропорционально времени, а согласно второму закону Кеплера. Поэтому пятно, которое в перигее находилось, например, на меридиане, проходящем через центр Луны, отклонится от центра, когда Луна совершит четверть оборота вокруг Земли. Наибольшая величина этой либрации равна $7^{\circ}54'$. Либрация по широте и либрация по долготе происходят одновременно и геометрически складываются, отчего величина либраций достигает 10° то в ту, то в другую сторону. Существует еще

физическая либрация — небольшое реальное покачивание Луны около оси своего вращения. Максимальная сумма всех этих либраций составляет $11^{\circ}25'$, вследствие чего нам доступно для наблюдений до 60% лунной поверхности.

§ 118. *Эволюция системы Земля — Луна.* В настоящее время Луна, совершая свое движение вокруг Земли на расстоянии в среднем 384 400 км, обращается вокруг последней в $27\frac{1}{3}$ суток. Действующее при этом приливное трение влияет на вращающуюся Землю как тормоз. В течение долгих веков существования системы Земля—Луна это торможение, несомненно, оказало заметное действие.

Соответствующее исследование произвел английский математик Дж. Дарвин, сын знаменитого биолога Ч. Дарвина, создавший современную динамическую теорию приливов. В некоторую отдаленную от нас эпоху периоды вращения Земли и обращения вокруг нее Луны имели одинаковую продолжительность и содержали приблизительно 4 или 5 наших теперешних часов. В это время Луна должна была находиться от поверхности Земли весьма близко. К этой эпохе Дарвин относил отделение Луны от Земли.

Будущее системы Земля — Луна надо себе представить примерно таким. Сутки и месяц, непрерывно увеличивая свою продолжительность, в конце концов сравняются и будут составлять 55 теперешних суток. Когда это будет достигнуто, наступит стадия длительной устойчивости системы Земля — Луна. Тогда Луна будет находиться в 1,6 раза *дальше* от Земли, чем теперь. Земля и Луна будут обращены друг к другу всегда одной и той же стороной, и, следовательно, приливное торможение перестанет иметь место.

Однако с течением веков действие *солнечных* приливов приведет к тому, что земные сутки станут снова уменьшаться, так что приливные горбы, или выступы, образованные действием Луны, опять начнут перемещаться по земной поверхности, но в прямо противоположном направлении, чем в прежние эпохи. Это приведет в свою очередь к тому, что Луна начнет постепенно приближаться к Земле. Когда Луна приблизится на расстояние, равное 2,5 земным экваториальным радиусам (на так называемый предел Роша), то земные приливы смогут окончательно нарушить ее равновесие и она распадется на два или несколько кусков.

§ 119. *Отсутствие атмосферы и воды на Луне.* Температура лунной поверхности. Согласно кинетической теории газов Луна могла лишиться своей атмосферы постепенно вследствие улетучивания частиц газов из ее атмосферы. В настоящее время атмосфера на Луне почти совершенно отсутствует. В самом деле, скорость улетучивания для Луны составляет только 2,38 км/сек. Водород и гелий должны были прежде всего покинуть атмосферу Луны. Что касается водяного пара, то он тоже должен был покинуть ее, если в прежние периоды своей геологической истории Луна была сильно нагрета и имела воду. Тогда кислород, азот и другие газы также должны были покинуть Луну. *Никаких сумеречных явлений на Луне никто из наблюдателей никогда не замечал.* Покрытия

различных звезд Луной наблюдались много раз, но из всех подобных наблюдений можно сделать только одно заключение: плотность лунной атмосферы никоим образом не может превышать $\frac{1}{2000}$ плотности земной атмосферы. *Спектр Луны является точной копией солнечного спектра*, только значительно ослабленной. Это тоже служит сильным аргументом против существования ощутительной атмосферы вокруг Луны. В последнее время В. Г. Фесенков и его ученик Ю. Н. Липский, применяя точный поляризационный метод, обнаружил признаки существования на Луне крайне разреженной газовой среды. Следовательно, на Луне мы можем предположить атмосферное давление, не превышающее $\frac{1}{3}$ мм ртутного столба.

Точно так же наблюдениями установлено, что *воды на Луне нет*, даже в состоянии льда, так как во время длинного дня на Луне (продолжительностью почти в 14 земных суток) вся вода в состоянии льда должна была бы обратиться в пар и рассеяться в окружающем пространстве.

В настоящее время при помощи термоэлемента измерили довольно точно температуру в разных местах лунной поверхности. В течение долгого лунного дня температура на Луне достигает небывалого на Земле значения $+100^{\circ}\text{C}$ и даже $+120^{\circ}\text{C}$. Но зато во время долгой лунной ночи температура на Луне столь же сильно опускается, примерно до -160°C . Луна поглощает около 93% падающего на нее солнечного тепла и отражает немного больше 7% солнечного света.

§ 120. Устройство поверхности Луны и объяснение особенностей ее рельефа. Лик Луны отличается весьма замечательными особенностями по сравнению с ликом Земли. В настоящее время различают пять главных типов лунных образований: 1) «*морья*», 2) *кольцевые горы: цирки, или лунные кратеры*, 3) *горные цепи*, 4) *трещины*, 5) *лучевые системы* (рис. 127—130).

Многочисленные кольцевые горы, цирки и кратеры являются главной особенностью лунного пейзажа. Они почти сплошь заполняют южную половину лунного диска. Им даны названия по именам ученых: Коперник, Тихо, Кеплер, Архимед и др. Эти так называемые «лунные кратеры» весьма сильно отличаются от одноименных земных образований. Земные кратеры имеют незначительные размеры. Так, один из наибольших на Земле вулканов Мауна-Лоа, расположенный на острове Гавайи, достигает только 10 км в поперечнике, между тем как на Луне есть цирки, во много раз большие. Например, лунный цирк Коперник (рис. 128) достигает в диаметре почти 90 км, а цирк Птолемей имеет в диаметре даже 185 км. Дно лунного кратера обыкновенно расположено ниже уровня окружающей местности, и на дне часто возвышается одна или несколько центральных горок. Они расположены обыкновенно близко друг к другу и у самого центра цирка.

Замечательные особенности лунного пейзажа представляют собой «морья» и горные цепи. Некоторые «морья» видны на диске

Луны даже простым глазом — в виде темных пятен. Эти большие темные области лежат, судя по измерениям, ниже светлых областей, усеянных кратерами, — это обширные впадины (рис. 127). Названия лунных «морей» были придуманы еще в XVII в. и сохранились до наших дней только по традиции. Эти названия: Море Дождей, Океан Бурь, Море Паров и др.

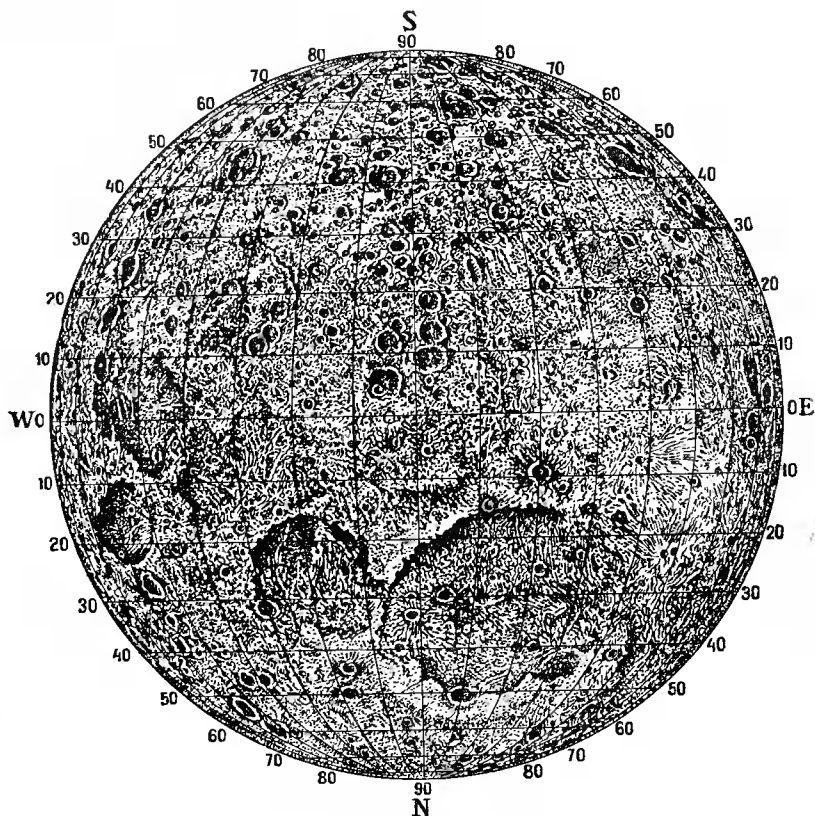
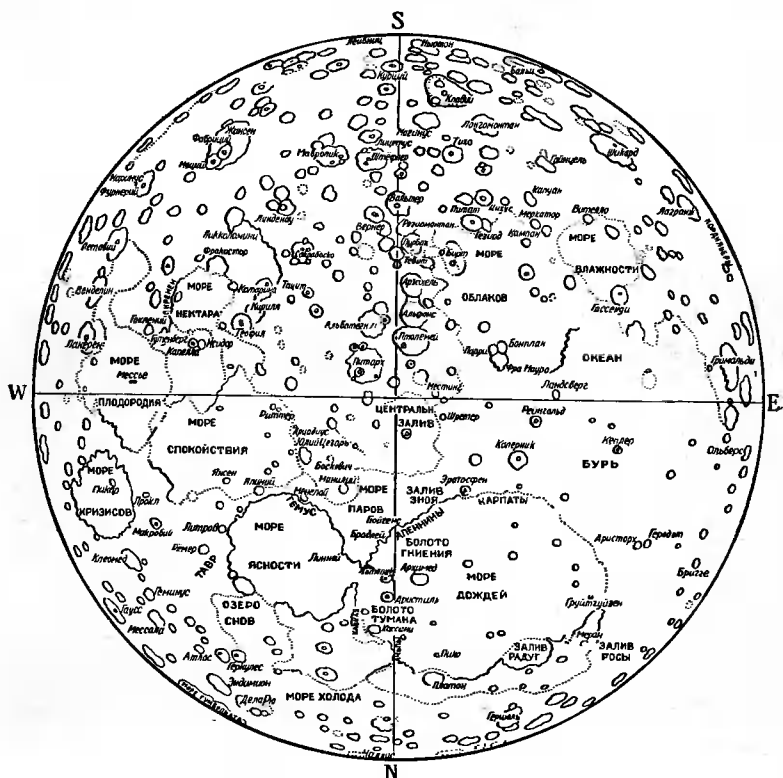


Рис. 125. Общая карта Луны

Другую особенность лунного пейзажа составляют горы и горные области, т. е. места, покрытые очень густо отдельными горными вершинами. Самые известные из таких горных областей — Альпы и Апеннины. Они были открыты еще Галилеем. Необходимо отметить, что горы на Луне *выше земных*, несмотря на то, что сама Луна значительно меньше Земли. Например, одна из вершин близ южного полюса Луны достигает высоты почти 9 км относительно соседних с ней низменностей.

Кроме перечисленных типичных форм лунного пейзажа, мы встречаем на Луне еще «трещины», или «бороздки», и «лучевые системы», или «светлые лучи». *Лунные трещины* — очень узкие и глубокие (рис. 129). Иногда они тянутся на несколько сот километров, совершенно не изменяя своего направления. «Светлые лучи» тянутся через лунные горы и «моря» на сотни, а в иных случаях и



126. Названия к карте Луны

на тысячи километров. Самая заметная система радиальных лучей тянется от кратера Тихо. Она особенно хорошо видна в полнолуние и находится в южной части лунного диска (рис. 130).

Главнейшие гипотезы, выдвинутые для объяснения особенностей лунного рельефа, — *вулканическая* и *метеоритная*. Вулканическую гипотезу можно формулировать следующим образом: лунные вулканы, или кратеры, — просто вулканы, подобные земным; в настоящее время они уже потухшие. Русский геолог академик А. П. Павлов предложил такую гипотезу: огромные лунные цирки представляют собой застывшие в настоящее время лавовые озера.

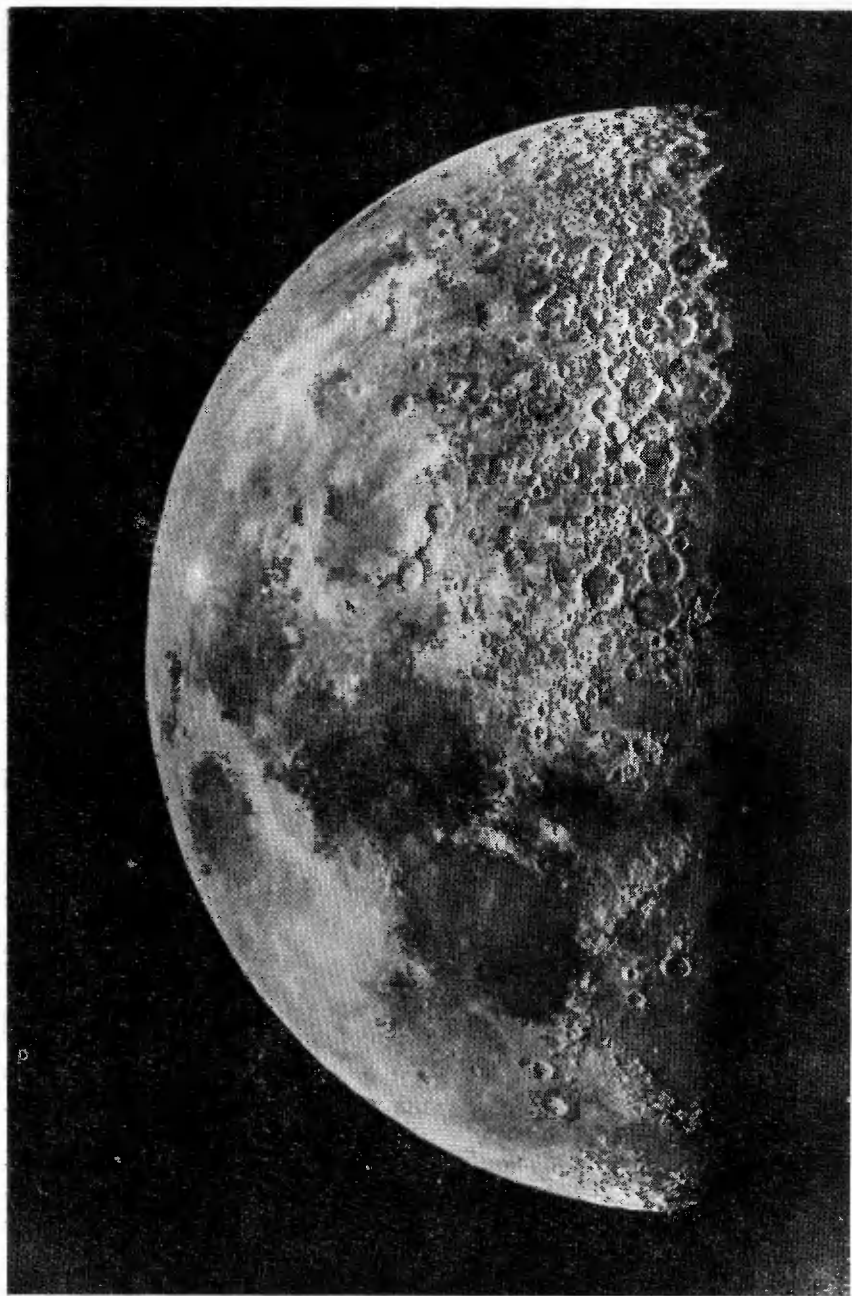


Рис. 127. Фотография Луны в первой четверти. (Видны «моря», кратеры и горные цепи)

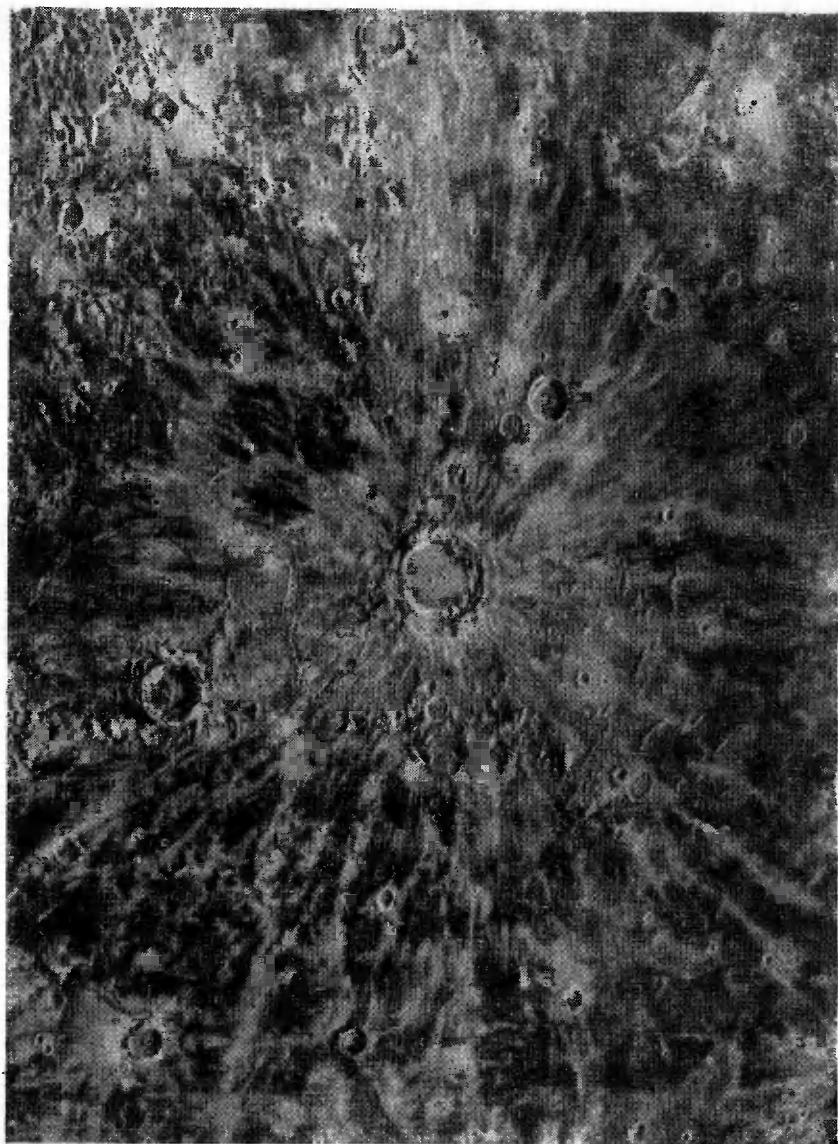


Рис. 128. Фотография лунной поверхности (в середине кратер Коперник)

Они образовались когда-то в результате подъема раскаленной лавы из недр Луны. Затем лава застывала и уровень ее понижался. Кольцевые валы около подобных застывших лавовых озер могли с течением времени сильно увеличиваться по высоте. Лава могла в редких случаях заполнять весь кратер почти до краев; тогда должна



Рис. 129. Область кратера Гигинуса

была образоваться почти круглая гора с совершенно плоской вершиной вроде столовых гор на Земле. На лунной поверхности есть такая гора. Она носит название Варгентин.

Метеоритная гипотеза выдвигалась рядом ученых. Согласно этой гипотезе даже большие лунные цирки — просто «воронки», образовавшиеся на лунной поверхности вследствие падения на нее крупных метеоритов.

Столкновения метеоритов с Землей и теперь случаются, вероятно, чуть не каждую секунду. Падения больших метеоритов на лунную поверхность в прежние времена геологической истории Земли и Луны, вероятно, не были редкими событиями. Это делает вероятным, что после падения большого метеорита на лунную поверхность на ней могла образоваться воронка огромнейших размеров: ведь даже при скоростях падения в 4 км/сек всякое тело взрывается и мно-

венно превращается в раскаленный пар. Следовательно, такую гигантскую воронку мы и будем наблюдать с Земли в виде огромного лунного цирка. Кратеры, образовавшиеся от падения гигантских метеоритов, существуют и на Земле, например кратер в пустыне Аризона в США.

Обе гипотезы, как вулканическая, так и метеоритная, встречают некоторые трудности. Например, для образования гигантских лунных цирков согласно вычислениям потребовались бы падения на лунную поверхность метеоритов в миллионы тонн ве-

сом (что мало вероятно). Но, с другой стороны, некоторые исследования последних лет говорят в пользу метеоритной гипотезы.

Природа «светлых лучей», или «лучевых систем», на Луне недавно была определена. В 2,5-метровый рефлектор удалось рассмотреть, что «светлые лучи» представляют собой низкие насыпи в несколько

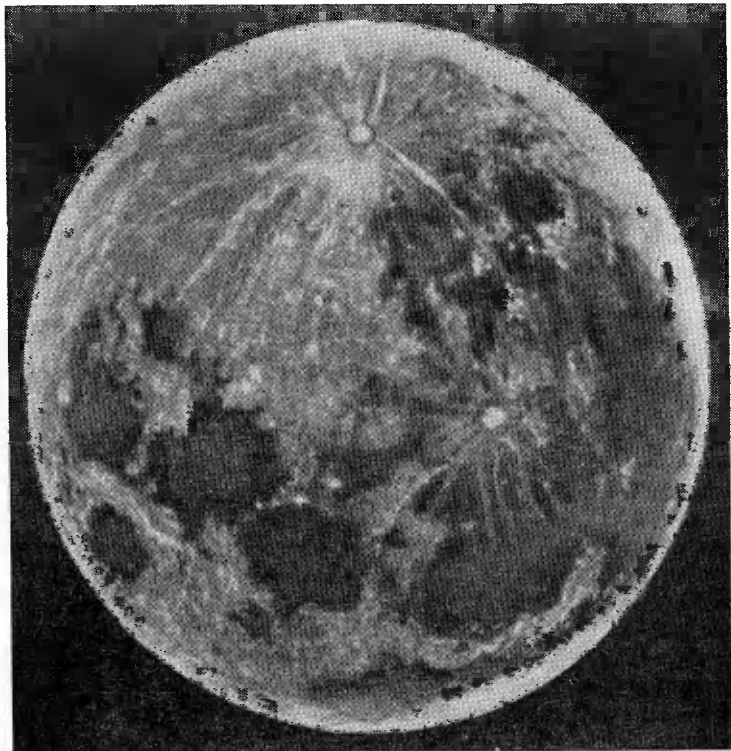


Рис. 130. Фотография Луны в полнолуние
(Видны «лучевые системы»)

метров высотой, но гораздо более широкие. Изучение отражения солнечного света от этих «светлых лучей» привело к заключению, что составляющее их вещество — порошкообразное. Следовательно, можно принять, что «светлые лучи» образовались вследствие оседания на поверхность Луны продуктов вулканических извержений. Такого рода изверженные вещества, вообще говоря, сильнее отражают свет, нежели окружающие их области. В силу этого они и кажутся в телескопы светлыми лучами. О том, что вулканические силы когда-то интенсивно действовали на Луне, свидетельствует химический состав пород, образующих лунную поверхность. При

помощи спектрофотометра имеется возможность сравнивать степень яркости различных частей спектра отражения у разных земных тел. Оказалось, что приблизительно такую же степень яркости цветов спектра, как лунные «моря», дает темная застывшая лава земных вулканов. Пепел, выброшенный из кратеров земных вулканов, имеет спектр отражения почти такой же. Было установлено, что отражательная способность дна лунных «морей» очень близка к отражательной способности лав Этны и Везувия. Эти исследования говорят нам о том, что лунные формации появились в результате мощной, вулканической деятельности, происходившей на поверхности Луны.

§ 121. Физические условия на Луне. Луна — мир совершенно своеобразный. На Луне нет ни атмосферы, ни воды. Стало быть, Луна — мир необитаемый, безжизненный. Ни животные, ни растения, подобные тем, какие мы встречаем на Земле, там существовать не могут. Небо на Луне — всегда совершенно черное; звезды на лунном небе видны и днем почти так же четко и хорошо, как и в течение долгой лунной ночи. Солнце там видно с протуберанцами и короной. Вследствие отсутствия атмосферы на Луне нет привычного нам на Земле «мягкого» дневного света. Тени там необыкновенно черны и резки. Лунная кора не подвергается ни выветриванию, ни размыванию. Однако сильные колебания температуры могут разрушать горные породы.

Каких-либо заметных изменений на лунной поверхности почти не было обнаружено. Один небольшой кратер Линней (в Море Ясности), как показали фотоснимки, бывает то видим, то невидим. Предполагается, что он периодически до краев заполняется лавой, отчего и становится невидимым. Затем лава снова уходит внутрь, и мы его опять видим.

§ 122. Спутники Марса были открыты в 1877 г. Марс был в то время в одном из великих его противостояний. Ближайший к планете спутник, как оказалось, совершает полный оборот вокруг Марса только за 7 часов 39 минут и обгоняет Марс в его суточном вращении. Значит, на небе Марса он должен двигаться с запада на восток, тогда как все светила там поднимаются над горизонтом с востока. В течение одних марсовых суток этот ближайший к планете спутник дважды восходит и дважды заходит.

Спутники Марса названы: ближайший — Фобос (Страх) и второй — Деймос (Ужас), как сопутствовавшие богу войны — Марсу. Они представляются звездочками 10—12-й звездной величины. Теоретическое изучение движения спутников Марса дало возможность определить с достаточной точностью массу планеты и ее сжатие.

§ 123. Спутники Юпитера. Когда Галилей 7 января 1610 г. направил свой слабый телескоп на планету Юпитер, он открыл у этой планеты четырех спутников, обращающихся вокруг нее. Эти четыре галилеевых спутника сравнительно очень ярки (5—6-й звездной величины). Они были бы видны и простым глазом, если бы вблизи них не было яркого Юпитера. Видеть их можно даже в

хороший полевой бинокль. Орбиты галилеевых спутников почти круговые и почти в точности лежат в плоскости экватора Юпитера. Эти спутники обычно обозначаются номерами I, II, III, IV — в порядке возрастания их расстояния от Юпитера. Кроме того, они имеют названия: Ио, Европа, Ганимед и Каллисто.

Очень интересны те явления, которые вследствие движений спутников Юпитера происходят в их системе почти каждый день. В хорошие телескопы можно наблюдать:

1) *затмения* спутников, когда спутник попадает в тень, отбрасываемую Юпитером (что совершенно аналогично затмениям Луны);

2) *покрытия* спутников Юпитером, когда тот или иной спутник скрывается за диском планеты;

3) *прохождения* спутников перед диском Юпитера, на котором они рисуются то темными, то светлыми кружками;

4) *прохождения тени* какого-либо спутника по диску планеты в виде черного пятнышка.

Эти явления, в особенности же затмения спутников в XVIII в., использовались для определения долготы на море, т. е. для кораблевождения. По их затмениям впервые была установлена и скорость распространения света. Поэтому астрономы XVIII в. особенно интересовались наблюдениями движений галилеевых спутников и составляли таблицы их движения.

Третий и первый спутники по своим размерам больше планеты Меркурия. Почти у всех них видны некоторые детали поверхности, и все они, по-видимому, постоянно обращены одной и той же своей стороной к центральному телу — Юпитеру. Плотность их довольно мала. В 1892 г. был открыт пятый — ближайший к Юпитеру — спутник. Он чрезвычайно слаб (19-й звездной величины). Этот спутник обращается всего за 12" около Юпитера, и его расстояние от центра планеты составляет всего лишь $2\frac{1}{2}$ радиуса последней. Последующие четыре спутника, гораздо более удаленные от Юпитера, чем первые пять, были открыты при помощи фотографии. В 1938 г. были открыты еще два спутника — десятый и одиннадцатый, а в 1951 г. был открыт также при помощи фотографии двенадцатый спутник. Сводка элементов спутников Юпитера содержится в Приложении 5. Спутники VIII, IX и XI имеют обратное движение, т. е. обращаются в противоположную сторону, чем преобладающее большинство спутников планет солнечной системы.

§ 124. Спутники Сатурна. Самый яркий спутник Сатурна — Титан (8-й звездной величины) — был открыт еще в 1655 г. Гюйгенсом, и затем еще четыре спутника Сатурна — Япет, Рея, Тефия и Диона — были открыты в том же XVII в.

В XVIII в. В. Гершель открыл двух еще более слабых спутников Сатурна, ближайших к планете. Они были названы Мимас и Энцилад. В 1848 г. был открыт еще один спутник, получивший название Гиперiona. Наконец, фотографическим путем был открыт наиболее слабый спутник, которого называли Фебой. Этот спутник

оказался обратным по направлению своего обращения вокруг Сатурна. Таким образом, у Сатурна известно всего 9 спутников. Сводка их элементов и расстояний имеется в Приложении 5.

Теоретическим путем наиболее надежно была определена масса Титана; она оказалась равной $1/411$ массы Сатурна. Массы других спутников очень малы. Масса Титана составляет 1,86 массы Луны, т. е. он почти вдвое массивнее последней. Наблюдения над изменениями яркостей сатурновых спутников показали, что все они, как и четыре галилеевых спутника, обращены к Сатурну всегда одной и той же своей стороной. Титан, как это показали спектральные наблюдения, окружен *атмосферой из метана*. Полоса поглощения метана в спектре Титана почти так же интенсивна, как в спектре Сатурна. Значит, метановая атмосфера у Титана почти столь же плотна, как и у самой планеты. У других крупных спутников Юпитера и Сатурна ничего подобного не обнаружено.

§ 125. Спутники Урана и Нептуна. У планеты Уран до 1948 г. было известно четыре спутника: Ариэль, Умбриэль, Титания и Оберон. В 1948 г. открыт пятый спутник, который был назван Мирандой. Этот вновь открытый спутник — ближайший к планете. Ариэль и Умбриэль 15—16-й звездной величины. Видеть их можно только в очень сильные телескопы. Пятый спутник еще слабее — он 17-й звездной величины. Двигутся спутники Урана почти в одной плоскости, под углом в 98° к плоскости орбиты Урана (см. Приложение 5). Движение их обратное.

У планеты Нептун в настоящее время известны два спутника — Тритон и Нереида. Яркость Тритона составляет 13,6 звездной величины. Орбита этого спутника наклонена к плоскости орбиты планеты под углом в 140° , иначе говоря, движение Тритона тоже обратное, как и движение спутников Урана. Второй спутник — Нереида — был открыт в 1949 г. Это самый слабый по видимому блеску из всех известных спутников (19,5 звездной величины). Изучение движения спутников Урана и Нептуна позволило хорошо определить массы этих планет и их сжатие.

Малые планеты, или астероиды

§ 126. История открытия малых планет. Большой промежуток между орбитами Марса и Юпитера давно наводил на мысль о существовании в этой области какой-то планеты. И вот совершенно случайно, работая над составлением звездного каталога, 1 января 1801 г. Пиацци в Палермо открыл первую малую планету, представлявшуюся слабой звездочкой 7—8-й величины. Планета получила имя Цереры.

Таким образом, промежуток между орбитами Марса и Юпитера был заполнен. Но 28 марта 1802 г. врач и любитель астрономии Ольберс открыл вторую малую планету (Палладу), движущуюся в поясе зодиака. Затем были открыты третья планета — Юнона —

и четвертая — Веста. Эти открытия прекратились до 1845 г., когда открыли пятую планету, которой дали название Астрея. С этого времени малых планет стали открывать по нескольку в год. Все подобные планеты стали называть *малыми планетами*, или *астероидами*.

Обращает на себя внимание резкое увеличение числа открываемых астероидов, начиная с 1891 г. Это объясняется тем, что с этого времени к открытию малых планет была успешно применена фотография.

Астероидам старались давать преимущественно женские имена; однако ввиду их многочисленности все они обозначаются и номерами, стоящими в скобках. При этом номер малой планеты дается только тогда, когда уже вычислена ее орбита. Особенно замечательные малые планеты выделяются иногда мужскими именами; так, например, одна особенно замечательная своим расположением относительно Солнца и Юпитера группа астероидов была названа «троянцами» (см. главу VI). Все малые планеты, составляющие эту группу, получили имена мифических героев троянской войны.

У нас в СССР много малых планет было открыто в Симеизской обсерватории (в Крыму). Одна из малых планет, открытых в Симеизе С. И. Белявским, получила в честь Владимира Ильича Ленина название Владилены; номер ее 852. Число открытых малых планет приближается к 2000. При поисках их фотографируют какую-нибудь область неба при помощи астрографа с часовым механизмом. Движение астрографа вслед за суточным вращением неба все время контролируется наблюдателем, почему звезды выходят на пластинке в виде правильных кружков, а малая планета вследствие своего движения среди них выходит на экспонируемой пластинке в виде штриха (рис. 131). Если же вести телескоп за малой планетой, то звезды выйдут штрихами, а планета кружком.

Все малые планеты видны только в телескоп, так как они слабее 6-й звездной величины. Лишь Весту иногда можно видеть невооруженным глазом, потому что она на небе выглядит в виде звездочки 5—6-й звездной величины. Открываемые в настоящее время малые планеты значительно слабее; они все 13—15-й звездной величины, изредка 12-й звездной величины.

§ 127. Орбиты малых планет. Особенности их движения. Орбиты малых планет вообще очень разнообразны. Подавляющее большинство их располагается между орбитами Марса и Юпитера, так что среднее расстояние от Солнца для первых 807 малых планет составляет 2,80. Большие полуоси их орбит заключаются между 1,46 астрономической единицы у (433) Эрота и 5,80 у (944) Гидальго. Эксцентриситеты орбит астероидов заключаются между нулем (имеется несколько малых планет с почти круговыми орбитами) и 0,75.

У малой планеты Эрот большая полуось равна 1,46 астрономической единицы, т. е. меньше большой полуоси Марса, которая равна 1,52 астрономической единицы. На протяжении большей

части своей орбиты Эрот движется внутри орбиты Марса и может подходить к Земле ближе, чем Марс. Это было использовано для более точного определения горизонтального параллакса Солнца. Несколько малых планет, открытых за последние годы, еще сильнее выходят за пределы пояса, расположенного между орбитами Марса и Юпитера, нежели орбита Эрота. Таков Гидальго, эксцентриситет орбиты которого равен 0,65. Имеются малые планеты с



Рис. 131. Фотография малой планеты среди звезд

эксцентриситетами, напоминающими эксцентриситеты кометных орбит. Их можно выделить в особую группу малых планет с кометными орбитами. У Гидальго и Адониса орбита вытянута даже сильнее, чем у многих комет. Наклонение орбиты Гидальго доходит до 43° . Малая планета Гермес, открытая в 1937 г., промчалась мимо Земли на расстоянии всего лишь 780 тыс. км. Гермес может иногда находиться от нас только вдвое дальше, чем Луна. Орбита Гермеса все же не так сильно вытянута, как орбита Адониса.

В 1949 г. был открыт астеронд, получивший название Икар (1566). Диаметр его равен всего полутора километрам, орбита его относится также к типу кометных орбит. В перигелии он приближается к Солнцу на расстояние, меньшее 28 млн. км (вдвое ближе

Меркурия), в афелии же отстоит от Солнца на 300 млн. км. Икар может приближаться к Земле на расстояние в 7 млн. км.

В распределении орбит астероидов существуют так называемые «пустоты». Теоретические исследования показали, что астероиды отсутствуют в тех областях пространства, где могут существовать только неустойчивые орбиты.

Среди малых планет выделяется группа так называемых *троянец*. Их в настоящее время известно 11: Ахилл, Патрокл, Гектор и др. Каждый из них движется вокруг Солнца, находясь всегда

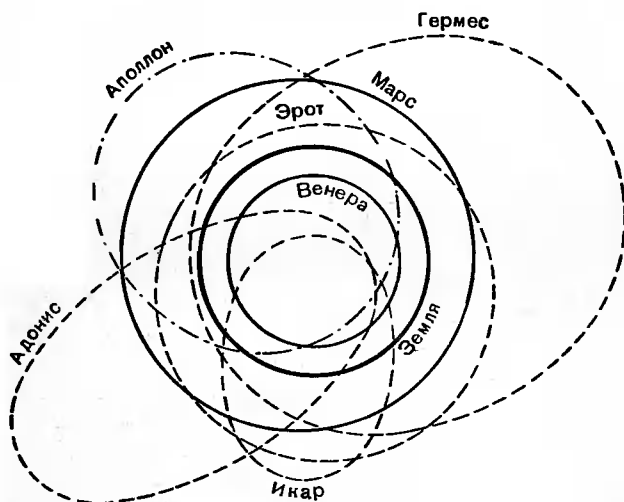


Рис. 132. Орбиты некоторых малых планет

приблизительно на 60° по долготе впереди или позади Юпитера. Для этого частного случая задачи трех тел, как уже было сказано, было найдено совершенно строгое решение. Солнце, Юпитер и какой-нибудь троянец должны в этом случае находиться в вершинах равностороннего треугольника, образованного расстояниями Солнце — Юпитер, Юпитер — троянец, троянец — Солнце.

§ 128. Физическое строение малых планет. Видимый блеск малых планет заключен в пределах от 6-й до 19-й звездной величины и даже слабее. Около 20% малых планет — слабее 13,5 звездной величины. Большинство слабых астероидов до сих пор еще не открыто. Диаметр наибольшего астероида — Цереры — составляет около 800 км. Альбедо их колеблется в пределах от 0,1 до 0,5. Приняв среднее альбедо малых планет равным 0,24, можно вычислить их приближенные диаметры по их видимому блеску на известном расстоянии. Оказалось, что диаметры астероидов в большинстве случаев меньше 100 км и заключаются в пределах от 15 до 75 км. Диа-

метры самых слабых из них достигают в некоторых случаях 1—2 км и даже меньше. Открытый в 1937 г. астероид Гермес, по-видимому, имеет диаметр, близкий к 1400 м.

Массы некоторых малых планет совершенно не поддаются определению. Суммарная масса всех астероидов, вероятно, лишь немногим больше 0,001 массы Земли.



Рис. 133. Зодиакальный свет

Многие малые планеты обнаруживают периодические изменения блеска (например, Ирида с периодом $6^h 12^m$). В особенности обращают на себя внимание замечательные изменения блеска астероида Эрот (433). Эрот — планетка очень маленькая; судя по блеску, она имеет в диаметре не более 25 км, но блеск ее меняется так ощутительно, что можно определить период изменения блеска Эрота ($15^h 16^m$) с двумя максимумами и двумя минимумами. Во время одного из великих противостояний Эрота сделано интересное открытие: планета имеет форму сигарообразного тела. Время вращения было найдено равным $5^h 17^m$, следовательно, в хорошем согласии с периодом изменения блеска Эрота. Периодическое изменение блеска некоторых малых планет привело к выводу, что они тоже вращаются вокруг оси. Форма малых планет считается вообще неправильной, не шаровидной, указывающей на то, что они являются «осколками» более крупных планетообразных тел.

§ 129. Зодиакальный свет и противосияние. Зодиакальный свет под тропиками имеет вид светящейся полосы, протягивающейся по всему небу. Там он ярче Млечного Пути. В наших широтах его можно видеть то на востоке (осенью, перед солнечным восходом), то на западе (после захода Солнца) в виде конусообразного серебристого сияния. Ось этого сияния лежит в плоскости эклиптики и протягивается по зодиакальным созвездиям (рис. 133).

Спектр зодиакального света является точной копией солнечного спектра, так что, очевидно, он производится отражением солнечного света от каких-то мелких частиц и пылинок. Все эти частицы образуют в пространстве довольно сжатый диск, частицы его в пространстве расположены чрезвычайно редко, так как на движение планет разреженное вещество зодиакального света почти никакого влияния не оказывает.

Противосияние имеет вид светлого овального пятна, расположенного в том месте неба, которое прямо противоположно Солнцу. Оно слабее зодиакального света, и его наблюдали весьма немногие. Разреженные рои частиц, производящих явление противосияния и зодиакального света, могут пополняться теми частицами, которые выбрасываются Луной и малыми планетами под действием бомбардировки этих космических тел крупными и мелкими метеоритами. Частицы зодиакального света должны, очевидно, образовывать вблизи Солнца и крупных планет пылевую среду, состоящую из чрезвычайно мелких частичек, которые при освещении их Солнцем и будут давать явление зодиакального света. Примерно 60% свечения ночного неба, несомненно, происходит от крайне слабого и нежного сияния зодиакального света.

Интересны исследования явления противосияния, сделанные за последнее время советскими астрономами. И. С. Астапович в результате своих наблюдений пришел к такому интересному выводу: от внешних частей атмосферы Земли в сторону, обратную Солнцу, должен тянуться «как бы газовый рукав, состоящий из потока молекул, или точнее — диссоциированных атомов, наподобие кометного хвоста». В. Г. Фесенков обосновал такое заключение подробными наблюдениями. Таким образом, наблюдения советских астрономов, сделанные за последние годы, позволяют допускать, что противосияние представляет собой скопление газа, наподобие «газового хвоста Земли». Этот вывод требует еще дальнейшей проверки.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

КОМЕТЫ, МЕТЕОРЫ И МЕТЕОРИТЫ

§ 130. Краткий очерк прежних воззрений на природу комет. Необычайный вид комет возбуждал во многих поколениях людей ужас, тревогу и всякие суеверные чувства. Невежественные люди считали кометы грозными небесными знамениями. В сильной степени на возникновение тревоги влияла внезапность появления комет. И в древности и в средние века кометы считали вестниками различных бед и несчастий. Интересно описание кометы 1066 г. в Лаврентьевской летописи: «В си же времена бысть знаменье на западе, звезда превелика, луче имущи акы кровавы, възсходящи с вечера по заходе солнцнем и пребысть за 7 дний; се же, проявляше не на добро: посем бо быша усобице много и нашествие поганых на Руськую землю, си бо звезда бе акы кровава, проявляющи кро-вопролитъе».

Средневековая Европа, проникнутая суевериями, предрассудками и верой во все сверхъестественное и чудесное, взирала на всякого рода небесные явления почти исключительно как на знамения «господнего гнева». Поэтому средневековые описания комет в различных хрониках и астрологических сочинениях были большей частью совершенно нелепы и фантастичны.

Только Тихо Браге из собственных наблюдений нашел, что комета 1577 г. была гораздо дальше Луны и быстро удалялась от Земли. Кеплер с особой тщательностью наблюдал комету 1607 г. (одно из появлений кометы Галлея). Но он полагал, что кометы проносятся через солнечную систему по прямым линиям. В своем сочинении о кометах и в «Сокращении коперниковой астрономии» Кеплер высказался о кометах следующим образом: «Небо так же полно кометами, как океан — рыбами. Мы видим только те из комет, которые, двигаясь в небесном воздухе (в эфире), проходят близко от Земли».

В «Математических началах натуральной философии» Ньютона мы находим решение задачи о движении комет. Ньютон первый предложил способ вычисления элементов кометных орбит по трем наблюдениям. При этом Ньютон предполагал, что кометы описывают очень вытянутые эллипсы, так что их орбиты можно принять параболическими без чувствительной погрешности.

В сотрудничестве со своим учеником Галлеем Ньютон применил свой способ определения параболических орбит к вычислению орбиты большой кометы 1680 г. Это вычисление, приведенное в «Началах», показало, что сравнение широт и долгот кометы, вычисленных теоретически, с наблюдаемыми дает очень хорошее согласие. Таким образом, было твердо установлено, что кометы движутся по своим параболическим орбитам под действием силы солнечного притяжения так же, как планеты по своим орбитам.



Рис. 134. Вид яркой кометы

Вскоре Галлей занялся вычислением орбит других комет, наблюдения которых он смог собрать в достаточном числе. В числе прочих он определил и орбиту кометы 1682 г., которую он наблюдал и сам. Результаты своих вычислений он опубликовал в сочинении, в котором он охватил появления комет в интервале времени с 1337 по 1698 г. Результатом обширных и трудных по тому времени вычислений Галлея была таблица параболических элементов 24 комет, причем оказалось, что элементы орбит комет 1531, 1607, 1682 гг. весьма сходны между собой.

Из большого сходства элементов орбит трех перечисленных комет Галлей заключил, что комета 1531 г. тождественна с кометой 1607 г., наблюдавшейся Кеплером, и с кометой 1682 г., которую он сам наблюдал. Тем не менее его смущало найденное им неравенство периодов обращения этих комет. Почему же периоды обращений не равны друг другу? Проникнувшись идеей Ньютона о действии массивных планет Юпитера и Сатурна на комету, он понял,

что неравенства периодов обращения обуславливаются возмущениями от упомянутых планет. Поэтому Галлей все же решился с уверенностью предсказать возвращение кометы 1682 г. на 1758 г. Комета действительно снова вернулась к Солнцу и 13 марта 1759 г. прошла через перигелий (рис. 135). Это была первая комета, относительно которой было установлено, что она периодическая. Теперь она называется кометой Галлея.

После 1759 г. она еще два раза возвращалась к Солнцу: в 1835 г. и в 1910 г. В следующий раз она должна возвратиться в 1986 г.

§ 131. Открытие комет и их орбиты. В настоящее время ежегодно открывают и наблюдают по нескольку комет, из которых некоторые являются периодическими, появляющимися уже не в первый раз и появление которых в определенной области неба и в определенное, заранее вычисленное время уже ожидалось. В зависимости от условий движения относительно наблюдателей на Земле и от яркости кометы за ней удастся следить иногда лишь несколько суток, а иногда более года. Кометы на фоне звездного неба постепенно перемещаются подобно тому, как перемещаются планеты. В порядке их открытия в течение данного года комета предварительно обозначается, например, как 1958а, 1958b и т. д. с прибавлением фамилии лица, заметившего ее первым. Позднее комета обозначается годом в порядке ее прохождения через перигелий. Например, комета 1958 IV—это комета, которая четвертой по счету прошла через перигелий в 1958 г.

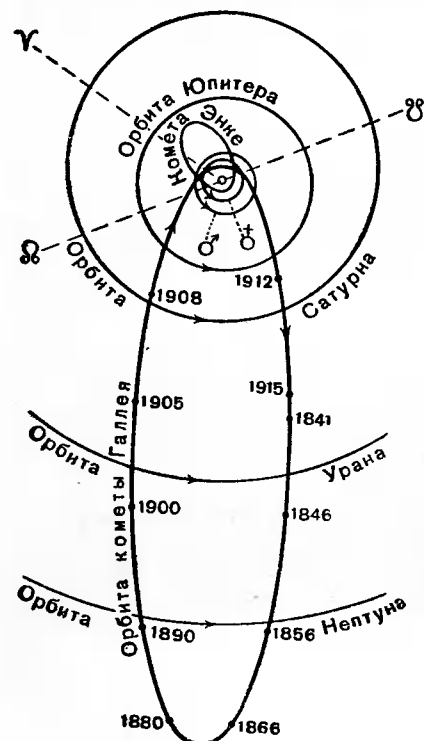


Рис. 135. Орбиты комет Галлея и Энке—Баклунда

Безусловно периодических комет в настоящее время известно сравнительно немного. Дело в том, что изучать орбиты комет весьма трудно, так как планетные притяжения все время довольно значительно изменяют их орбиты. Комет, обращающихся вокруг Солнца по явно эллиптическим орбитам, известно около 170, но из них только 38 наблюдались проходящими около Солнца более одного раза. Список периодических комет, у которых наблюдались большие четырех полных оборотов вокруг Солнца, содержит только 13 комет.

Более или менее хорошо мы можем проследить движение кометы по небольшой части всей ее орбиты, которую мы часто не можем вполне уверенно отличить от параболической.

Известно около 47 комет с периодами от 100 до 1000 лет и около 30 комет с периодами от 1000 до 10 000 лет. Определение таких больших периодов подвержено очень большим неточностям.

Недавно обнаружена комета (Отерма), движущаяся по почти круговой орбите между Марсом и Юпитером в зоне малых планет. С другой стороны, мы знаем сильно вытянутые эллиптические орбиты мелких астероидов. Поэтому между орбитами комет и малых планет нет принципиальных различий, а астероиды — это планеты и члены солнечной системы. Отсюда заключаем, что все кометы — члены солнечной системы, из которых большинство движется по эллипсам с гигантскими периодами обращения, и лишь вследствие возмущений редкие кометы, приобретая гиперболические орбиты, уходят из солнечной системы.

§ 132. Стрoение комет. В каждой комете различают *голову* и *хвост*. Эти части ярких комет лучше всего различаются в период полного развития кометы, т. е. обычно около времени прохождения ее через перигелий. *Ядром* называется наиболее яркая часть головы кометы, оно имеет звездобразный вид, а иногда похоже на туманный сгусток: оно просвечивает сквозь разреженную светлую массу, составляющую голову кометы (рис. 136). Хвост кометы представляет собой самый интересный ее придаток; у некоторых комет он иногда бывает очень ярким и невооруженному глазу представляется как бы потоком тонкой светящейся материи, исходящим из головы кометы.

Кометы имеют грандиозные размеры. В самом деле, поперечник головы сравнительно небольшой кометы 1908 III достигал 300 тыс. км, поперечники голов больших комет (например, 1811 I) — порядка 1 млн. км; следовательно, поперечники голов комет по своей величине соперничают с размерами Солнца. Хвосты комет, как это видно из таблицы 7, достигают чудовищных размеров.

При таких грандиозных размерах массы комет, почти полностью сосредоточенные в их ядрах, совершенно ничтожны. Даже у больших комет они по крайней мере в миллиард (10^9) раз меньше массы нашей Земли. По своим массам кометы занимают промежуточное место между малыми планетами и метеоритами.

Хвосты и головы комет весьма прозрачны, так как состоят из весьма разреженных веществ. Астрономы часто наблюдали слабые звезды сквозь хвосты и даже сквозь головы комет.

Хвосты комет столь разрежены, что в лучших вакуумах, которые мы можем получить в настоящее время в наших лабораториях,

Таблица 7

Комета	Длина хвоста в млн. км
1858 VI (Донати)	85
1910 I	110
1811 I	176
1680 I	240
1843 I	320

плотность газов гораздо больше, нежели в хвосте кометы. На основании изучения яркости хвоста кометы Галлея в 1910 г. оказалось возможным сделать следующую оценку плотности вещества, со-



Рис. 136. Голова кометы

ставляющего этот хвост: в 10 тыс. m^3 должно было заключаться примерно столько же вещества, сколько его имеется в 15 cm^3 обычного воздуха.

§ 133. Некоторые замечательные кометы. а) Комета Галлея. Из анализа летописей и наблюдений в новое время установ-

лены следующие даты появления этой кометы в прежние годы: 240 г. до н. э., 66, 141, 218, 295, 373, 451, 530, 607, 684, 760, 837, 912, 989, 1066, 1145, 1222, 1301, 1378, 1456, 1531, 1607, 1682, 1758, 1835, 1909—1910 гг. Через месяц после своего прохождения через перигелий комета 19 мая 1910 г. прошла между Солнцем и Землей. В это время Земля, по-видимому, прошла через вещество хвоста и пробыла в нем, быть может, даже несколько часов.

Никаких особенных явлений в связи с предполагаемым прохождением Земли через кометный хвост, однако, не наблюдалось. Период времени от одного прохождения через перигелий до другого вследствие сильных возмущений от больших планет изменяется у кометы Галлея почти на 5 лет. Однако отклонение от среднего периода, оцениваемого в 77 лет, вообще говоря, редко превышает $2\frac{1}{2}$ года. Яркость кометы Галлея по сравнению с прежними ее появлениями, по-видимому, несколько уменьшилась.

б) Комета Энке — Баклунда. Эта замечательная комета была открыта в конце 1818 г. Она отличается очень коротким периодом обращения вокруг Солнца — всего в 3,3 года — и его изменчивостью. Астроному Энке удалось доказать, что эта комета была, несомненно, наблюдаема астрономами в

1786, 1795 и 1805 гг. Тщательное исследование показало, что при помощи обычной теории возмущений никак нельзя объяснить особенностей движения кометы. После возвращения кометы в 1822 г. Энке высказал гипотезу, что на комету действует некоторая сопротивляющаяся среда, которая то замедляет, то, напротив, несколько ускоряет ее движение. За дальнейшую разработку теории кометы взялся астроном О. А. Баклунд, впоследствии директор Пулковской обсерватории. Он пришел к выводу, что возможные причины изменения в движении кометы заключаются в столкновениях ее с какими-то роями метеорных тел.

в) Комета Белого (Бизэлы) оказалась тоже периодической с периодом обращения в $6\frac{3}{4}$ года и наблюдалась в 1772, 1806, 1826 и 1832 гг., причем блеск ее был незначительный. В 1846 г. комета Белого неожиданно разделилась на две части; в каждой из двух комет-близнецов образовались отдельные ядро и хвост (рис. 137). Обе кометы-близнецы наблюдались еще один раз в 1852 г. на расстоянии около 2 400 000 км одна от другой. Обе они наблюдались



Рис. 137. Комета Белого (Бизэлы)

в течение месяца, а затем их больше уже не видели. Комету Белого не видели и в 1872 г., хотя она в этот год должна была подойти к Земле на очень близкое расстояние. Но в ночь на 26 ноября 1872 г. и в Европе и в Северной Америке наблюдался весьма обильный дождь падающих звезд. Таким образом, комета Белого, по-видимому, окончательно распалась в метеорный поток. Было доказано, что орбита этого потока почти тождественна с орбитой кометы Белого.

г) Комета Швассмана — Вахмана. Эта комета была открыта 15 ноября 1927 г. астрономами Швассманом и Вахманом. Изучение ее движения показало, что она движется по почти круговой орбите. Свой путь вокруг Солнца она завершает в 16 с небольшим лет, эксцентриситет ее орбиты составляет 0,14, т. е. он меньше, чем у Меркурия. Таким образом, орбита ее напоминает скорее орбиту большой планеты.

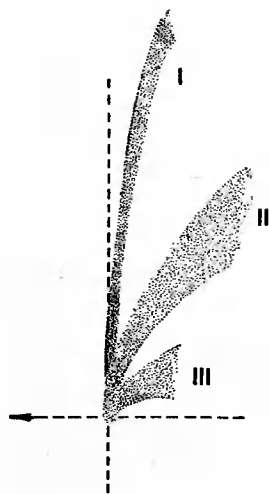


Рис. 138. Типы кометных хвостов по Бредихину

§ 134. Механическая теория кометных форм. Наблюдая движения вещества в хвостах комет прочь от Солнца, астрономы давно пришли к выводу о существовании «отталкивательной силы Солнца».

Так называемая механическая теория кометных форм создана главным образом крупнейшим русским астрономом Ф. А. Бредихиным. Его классические исследования позволили составить общую картину образования хвоста комет. Из ядра всякой кометы по направлению к Солнцу под действием нагревания солнечными лучами вылетают некоторые частицы; затем действие

исходящей от Солнца отталкивательной силы как бы тормозит их движение к Солнцу и отбрасывает их назад, т. е. прочь от Солнца, что и обуславливает образование хвоста. Это движение напоминает падение струи воды в фонтанах. Бредихин смог вполне удовлетворительно объяснить большинство подробностей, наблюдаемых при образовании кометных хвостов действием отталкивательной силы, исходящей от Солнца.

Ф. А. Бредихин установил первую ясную классификацию кометных хвостов, основания которой сохранились и до нашего времени. По классификации Бредихина, хвосты кометы делятся на три типа, отличающиеся один от другого величинами ускорений отталкивательной силы Солнца (рис. 138), действующей на их частицы:

1) хвосты I типа образуются под действием отталкивательных сил, в десятки раз превышающих силу ньютоновского притяжения; они почти прямые и сравнительно мало отклонены от продолжен-

ного радиуса-вектора кометы; такие хвосты, особенно у слабых комет, встречаются чаще всего;

2) хвосты II типа образуются под действием отталкивательной силы, приблизительно равной силе ньютоновского притяжения; эти хвосты более изогнуты и более отклонены от продолженного радиуса-вектора кометы; такие хвосты наблюдаются редко;

3) хвосты III типа еще более изогнуты и более коротки, чем хвосты II типа, и образуются под действием отталкивательной силы, составляющей $0,3-0,0$ ньютоновского притяжения; такие хвосты наблюдаются редко.

Продолжая и развивая работы Бредихина, проф. С. В. Орлов создал, в частности, более подробную классификацию кометных хвостов, которая может быть пояснена таблицей 8.

Таблица 8

Классификация кометных хвостов по С. В. Орлову

0 тип	Отдельные прямолинейные лучи, представляющие собой концы движущихся к ядру оболочек кометы	Отталкивательные силы Солнца порядка 1000
I »	Прямые хвосты с неправильными очертаниями; располагаются по радиусу-вектору ядра; состоят из отдельных изогнутых струек и облачных образований	Отталкивательные силы кратны $22,3 n$, где $n=1, 2, 3, \dots$
II »	Сильно изогнутые хвосты; состоят из отдельных синхрон (поперечных полос, направленных к ядру)	Отталкивательные силы принимают все значения от 2,5 до 0,5
III »	Прямые хвосты; состоят из одной синхроны, начинающейся непосредственно от головы кометы	Отталкивательные силы принимают все значения от 0,3 до 0,0
IV »	Имеют вид слабой полосы, тянущейся от головы кометы по направлению к Солнцу	Отталкивательные силы равны нулю

К этим основным типам С. В. Орлов прибавил еще V тип: расширяющиеся галосы в виде кругов с центром в ядре кометы; отталкивательная сила Солнца для частичек в галосах равна нулю.

В заключение подытожим еще раз имеющиеся в настоящее время сведения о силах, действующих на кометы; на ядра комет действует главным образом сила солнечного тяготения; на частицы кометных хвостов действуют главным образом отталкивательные силы Солнца, и все частицы хвостов движутся по гиперболическим орбитам, причем своей выпуклостью эти гиперболы обращены к Солнцу. Следовательно, *вещество кометных хвостов навсегда покидает комету и рассеивается в пространстве.*

Федор Александрович Бредихин (1831—1904) — один из крупнейших астрономов XIX в., приобретший мировую известность как творец теории кометных форм и происхождения метеорных потоков из комет. В развитии русской науки он сыграл выдающуюся роль как руководитель и преобразователь Пулковской обсерватории. Им сделано было много для того, чтобы среди ее работников было меньше выходцев из-за рубежа и больше отечественных ученых.

Основные положения развитой Бредихиным механической теории кометных хвостов таковы. На частички кометных хвостов, извергающиеся из кометных ядер, влияют две силы: ньютоновское

притяжение и отталкивательная сила Солнца: в результате сложения этих двух сил частица хвоста получает некоторое «эффективное», или результирующее, ускорение.

Можно показать математически, исходя из дифференциальных уравнений движения частиц хвоста комет, что если вектор эффективного ускорения направлен от Солнца, то частицы кометного хвоста под действием отталкивательных сил Солнца будут двигаться по гиперболическим орбитам. Бывает, однако, и так, что вектор μ направлен к Солнцу. Тогда частицы хвоста движутся, вообще говоря, под действием ослабленной силы ньютоновского тяготения. По большей части они и в этом случае движутся по гиперболическим орбитам. Наконец, μ может



Ф. А. Бредихин
(1831—1904)

быть иногда равным нулю, а именно, когда сила солнечного отталкивания равна силе его притяжения. В этом случае частицы кометного хвоста движутся относительно Солнца прямолинейно и равномерно, по инерции.

Излияния газа из кометных ядер могут происходить отдельными взрывами. В результате подобных взрывов сразу выделяются целые облака частиц. Конечно, каждая частица такого облачного образования будет двигаться только под действием свойственного ей ускорения отталкивательной силы Солнца, и эти ускорения, действующие на различные частицы, могут принимать все значения между данными пределами. Та кривая, по которой расположатся все частицы, вышедшие из ядра в момент t_1 , с одними и теми же начальными условиями движения, притом движущиеся под действием отталкивательных сил Солнца, принимающих все зна-



Рис. 139. Комета Морхауза (по фотографии)

чения между данными пределами, называется, по предложению Ф. А. Бредихина, *синхроной*.

С другой стороны, можно построить так называемую *синдинamu*, т. е. ту кривую, по которой расположатся все частицы, вылетевшие из кометного ядра при одних и тех же начальных условиях движения в различные моменты и движущиеся под действием одного и того же ускорения.

По теории Бредихина, хвост кометы в общем представляет собой как бы «рог», пустой внутри, т. е. полый коноид. Поэтому средняя часть кометного хвоста представляется глазу менее яркой, что и отмечено на различных рисунках. Наблюдались кометы (1858 VI Донати), обладавшие двумя хвостами. Надо еще сказать, что в хвостах комет иногда наблюдаются волокнистые скопления светящейся материи, разрывы на отдельные части, волнистые изгибы и т. п. образования, хорошо объясняемые теорией. Они отчетливо видны на фотографии кометы Морхауза, воспроизведенной на рисунке 139.



Рис. 140. Комета Аренда—Ролана (по фотографии)

Бредихин назвал аномальными, крайне редко наблюдаемые, слабо светящиеся короткие хвосты, направленные не от Солнца, а к Солнцу. Он рассматривал их как вереницы легких твердых частиц, вырывающихся из ядра кометы при взрыве. Не испытывая заметного давления со стороны солнечного света, они распространяются преимущественно вдоль орбиты кометного ядра и светят отраженным светом Солнца. Исключительный по яркости и длине аномальный хвост наблюдался в апреле — мае у кометы 1957 г. (Аренда—Ролана), которая с ее хвостом хорошо была видна невооруженным глазом (рис. 140). Наблюдения этой кометы подтвердили правильность теории аномальных хвостов, созданной Бредихиным.

§ 135. Физическая природа комет, происхождение и распад их. Механическая теория кометных форм объясняет многие явления в кометах, но ничего не говорит о природе отталкивательных сил, о физическом и химическом строении комет. Для выяснения их нужно прежде всего обратиться к наблюдениям. Последние показывают, что яркость комет изменяется быстрее, чем обратно пропорционально квадрату их расстояния от Солнца. Это значит, что если в комете

и есть неизменная по величине поверхность, отражающая свет Солнца, то комета светит все же не простым отраженным светом Солнца. Последнее подтверждается спектральными наблюдениями. Как правило, кометы в общем дают спектр излучения, состоящий из ярких полос, принадлежащих разным молекулам. *Спектр хвоста показывает, что последний состоит из крайне разреженной и ионизированной окиси углерода (CO^+) с примесью ионизированного молекулярного азота (N_2^+).*

Спектр головы кометы показывает, что она состоит из более плотных (но тоже очень разреженных) газов: углерода C_2 , циана CN и некоторых других молекулярных соединений. Эти молекулы из головы далеко не проникают в хвост кометы, по-видимому, потому что, вылетев из ядра и подвергаясь действию солнечных лучей, они распадаются на составные части.

Хотя циан и окись углерода (угарный газ) ядовиты, их нахождение в комете безопасно для Земли, если последняя пройдет сквозь хвост или даже сквозь голову такой кометы. Причина этого заключается в чрезвычайной разреженности кометных газов. Они не смогут ни проникнуть в нижние слои воздуха, ни создать в нем заметную примесь, опасную для дыхания.

Наблюдаемое непосредственно ядро в виде светлого сгущения в голове кометы имеет линейный диаметр тем меньше, чем ближе к нам комета или чем сильнее телескоп, в который рассматривают ядро. Это показывает, что сплошное, твердое ядро не должно превосходить нескольких десятков километров в диаметре и может быть видимо только как звездочка, не имеющая заметного диска на том расстоянии, на котором мы наблюдаем кометы. Световое сгущение, часто называемое ядром и обволакивающее такую, иногда заметную, а иногда невидимую звездочку, представляет уплотнение газов около твердого ядра, из которого они выделяются под действием нагревания ядра солнечными лучами. Естественно, что нагревание ядра сильнее всего на той стороне его, которая обращена к Солнцу, и потому струйки газа, как мы видим, направляются из ядра к Солнцу. Там их подхватывает отталкивательная сила Солнца и гонит хвост кометы, который заметен лишь в том случае, когда газов из ядра выделяется достаточно много. Ядро, как и всякое твердое тело, содержит в себе поглощенные газы, которые выделяются тем энергичнее, чем сильнее нагревание тела. Поэтому-то с приближением к Солнцу из ядра кометы выделяется все больше газов, они светятся тогда в общей массе все ярче, и иногда их достаточно, чтобы образовать кометный хвост.

Газы головы и хвоста кометы светятся под действием солнечных лучей в процессах резонансного излучения и флуоресценции.

Твердое ядро кометы светит отраженным светом Солнца и потому его спектр — копия солнечного. Каково строение ядра, является ли оно сплошной глыбой или состоит из множества мельчайших кусочков, разделенных большими промежутками, выяс-

нить очень трудно. Некоторые ученые допускают, что ядра комет состоят из смеси камней и замерзших газов, и тогда их размеры могут быть меньше, чем указывалось выше.

Ядро кометы Галлея имело массу, равную массе небольшого астероида. Столкновение Земли с кометным ядром (событие, как говорит теория вероятности, почти невозможное) не может быть поэтому катастрофичным для Земли, тем более, что ядро состоит из отдельных кусков, скорость которых при падении будет сильно тормозиться сопротивлением земной атмосферы.

Заметим, что когда кометное ядро подходит к Солнцу очень близко, то оно начинает плавиться и испаряться. В таких случаях в его спектре наблюдаются яркие линии железа и никеля, а линии паров легко испаряющегося натрия появляются уже тогда, когда комета отстоит от Солнца примерно на одну астрономическую единицу. Это объясняется тем, что до некоторой степени испаряются все твердые тела, а не только расплавленные.

Что касается природы отталкивательной силы в хвостах комет, то для мелких пылинок в комете ее надо видеть *в световом давлении на твердые тела*, которое так блестяще было доказано на опыте московским физиком П. Н. Лебедевым. *На молекулы газов, находящиеся в кометном хвосте, также должно действовать световое давление, но так называемое селективное давление, связанное с частотой квантов света, которые эти молекулы способны поглощать.* Для хвостов I типа, содержащих CO^+ , вычисленное таким образом световое давление оказывается, однако, меньше наблюдаемого.

На целом ряде комет астрономы убедились в возможности дробления или распада комет на части. Комета Белого (Биэлы), наблюдавшаяся в середине XIX в., почти на глазах у наблюдателей разделилась на две кометы, которые затем больше не наблюдались. Зато вместо нее наблюдался неоднократно метеорный поток, очевидно, из нее образовавшийся. В 1846 г. наблюдалось четыре случая деления кометных ядер, давших начало новым кометам. Орбиты этих новых комет были близки к орбитам комет-родоначальниц. Следовательно, если приписать эти деления различных комет взрывам, то эти взрывы были сравнительно слабыми. Теперь выяснено, что орбита кометы Белого близко подходит к орбите метеорного потока леонид.

Большая сентябрьская комета 1882 II имела яркое ядро, которое стало заметно деформироваться. Оно систематически удлиннялось по направлению к Солнцу. В октябре ядро казалось резко веретенообразным, и в нем можно было заметить несколько отдельных светящихся сгустков вещества. Эти сгустки постепенно все дальше и дальше отходили один от другого. Они стали двигаться по отдельным эллиптическим орбитам с периодом обращения от 600 до 900 лет. Сама комета-родоначальница описывает вокруг Солнца эллипс с эксцентриситетом, близким к единице, и с периодом обращения около 700 лет. Расстояние перигелия от Солнца было очень малым и равнялось только 0,00775 астрономической единицы. Сле-

довательно, когда комета проходила через перигелий, то всего 450 тыс. км отделяло ее от солнечной поверхности. По-видимому, в ядре произошло что-то вроде взрыва, который и разбросал «осколки» кометного ядра. Таким образом, деление кометных ядер и затем самих комет наблюдалось неоднократно.

Ф. А. Бредихин высказал гипотезу взрывов, согласно которой кометное ядро может выделить из себя целые рои телец и частичек, начинающих затем двигаться по орбитам, в общем довольно сходным с орбитой кометы-родоначальницы. Согласно взглядам продолжателя работ Бредихина С. В. Орлова главную роль в делении и распадении комет играют встречи с ними роев метеорных телец. Подобные столкновения при больших встречных скоростях комет и метеорных частичек могут обусловить возникновение в ядрах комет сильных взрывов, что в свою очередь ведет к образованию метеорных потоков.

С. К. Всехсвятский, работая по фотометрии комет, обратил особое внимание на постепенное уменьшение яркости комет *с течением времени*. Оказывается, яркость короткопериодических комет по мере повторения их приближений к Солнцу все время уменьшается. Отсюда следует, что 100—200 лет назад эти кометы должны были быть чрезвычайно яркими. Почему же они в то время не были открыты? С. К. Всехсвятский выдвигает смелое предположение: потому, что они еще не существовали. Следовательно, все короткопериодические кометы образовались сравнительно недавно. Может быть, они образуются и теперь.

Возможен взгляд на кометы и как на остатки, хотя бы и измененные, тех твердых частиц, из которых некогда могли сформироваться планеты.

§ 136. Метеоры, болиды и метеориты. Почти каждую ясную ночь могут быть наблюдаемы метеоры, называемые в просторечии «падающими звездами». Это название неправильно, так как явление метеоров не имеет никакого отношения к видимым нами на небе звездам. В действительности в земную атмосферу влетает крошечное тельце, обычно в несколько долей грамма весом, но зато движущееся с огромной скоростью. В результате его взаимодействия с молекулами воздуха на определенной высоте в атмосфере оно испаряется, создавая на своем пути явление светлого следа. Самое слово *метеор* (это слово древнегреческое) значит — явление, происходящее в воздухе на некоторой высоте. Космическое тельце, производящее явление метеора, называется *метеорным телом*. Очень маленькие метеорные тела с массой в доли миллиграмма производят явление телескопических метеоров, т. е. таких, которые можно наблюдать только при помощи телескопов. Наиболее крупные тела иногда вызывают очень эффектные явления — появление больших ярких метеоров или огненных шаров с силой света, достигающей иногда миллионов свечей. Такие крупные, яркие метеоры носят название болидов (рис. 141). Число телескопических (видимых в телескоп) метеоров весьма велико.

Подавляющее большинство метеорных тел движется по эллиптическим орбитам. Эта группа метеоров, несомненно, частично является остатками кометных ядер.

Метеорные тела, обладающие массами менее грамма, совершенно испаряются на высоте 130—80 км над земной поверхностью. Яркие метеоры в некоторых случаях, конечно, можно исследовать гораздо более полно, чем слабые, телескопические. Так, 14 августа 1932 г.



Рис. 141. След болида (по фотографии)

под Москвой была определена скорость одного яркого метеора: на высоте 85 км над земной поверхностью его скорость составляла 48 км/сек, а на высоте 60 км — только 36 км/сек. Из многих наблюдений было найдено, что яркие метеоры и болиды в среднем «погасают» на высоте 60—40 км. Вообще, чем крупнее метеорное тело, тем больший путь оно в состоянии пройти в слоях земной атмосферы.

Падение большого и яркого болида представляет картину весьма эффектную. Подобные падения отмечались в русских летописях. Например, в одной из таких летописей под 1091 г. летописец отметил падение болида такой характерной фразой: «Спаде превелик змий от небесе». Довольно часто яркие болиды представляются

огненными шарами, в некоторых случаях — со змеевидными хвостами, что и породило, видимо, у наших предков сказки о змеях-горынычах и об огненных драконах.

Обычно на большой высоте цвет яркого болида бывает красноватый, а затем, при его проникновении в более плотные атмосферные слои, становится желтым и даже белым. Позади него обычно наблюдается *светящийся метеорный след*, состоящий из ионизированного воздуха.

На высоте около 75—80 км перед головной частью летящего метеорного тела возникает скачок уплотнения и образуется своего рода «подушка» из сильно сжатого воздуха, так называемая *метеорная оболочка*. Она сильно нагрета. Изучение спектров ярких метеоров привело к выводу, что температура ее достигает 2000—3000° К. Поэтому поверхность летящего метеорного тела плавится. Потоки встречного воздуха срывают с его поверхности мельчайшие капельки раскаленного вещества, и наблюдатель видит в иных случаях, что болид разбрасывает от себя словно снопы искр; примерно в это же время у болида (правда, далеко не всегда) начинает образовываться «огненный» хвост, в действительности состоящий из светящихся, сильно раскаленных частичек.

Примерно на высоте 50—60 км блеск летящего болида достигает некоторого максимума. Цвет его становится ярко-голубым, так что все кругом озаряется голубоватым сиянием. Состоящая из раскаленных газов оболочка болида, по-видимому, пульсирует.

На высоте 30 км блеск болида обычно уменьшается, цвет его тоже меняется, скорость полета уменьшается вследствие того, что сильно сказывается тормозящее действие воздуха. Наконец, болид исчезает совсем, и на его месте появляется небольшое облачко, т. е. так называемый *пылевой след*, остающийся после его полета. Он состоит из мельчайших пылинкок, отделенных от тела болида и рассеянных в разные стороны примерно на 40—50 м. Пылевой след бывает длиной до 10—30 км. Пылинки, отделившиеся от тела болида, очень малы. Они оседают на поверхность Земли крайне медленно, так что пылевые следы можно в некоторых случаях видеть часа два.

Когда болид исчезает, метеорное тело (ранее казавшееся нам болидом) продолжает двигаться дальше, но, однако, уже только со скоростью примерно *нескольких сот метров в секунду*, падая на поверхность Земли. Космическая его скорость полностью утрачивается тогда, когда прекращаются все световые явления. Та часть пути метеорного тела, в которой происходит его окончательное торможение, называется «точкой (или областью) задержки». Далее оно падает, подчиняясь закону свободного падения тел. Но в отдельных случаях метеорное тело может достигнуть земной поверхности с остатками космической скорости. Такие случаи имеют место, когда на Землю падают очень крупные массы в сотни и тысячи тонн. Тогда в момент соприкосновения с земной поверхностью, если скорость метеорита больше 3,5 км/сек, происходит взрыв.

Метеорное тело в значительной части превращается в раскаленный газ, а на месте взрыва образуется кратер, вокруг которого выпадают небольшие осколки метеоритной массы. Такой вывод можно сделать потому, что изучение всех известных метеоритных кратеров показало, что пока ни в одном из них не удалось обнаружить крупных метеоритных масс; напротив, около каждого метеоритного кратера были найдены лишь небольшие осколки метеоритной массы.

Само метеоритное тело, полет которого в среднем продолжается 6—8 секунд, горячо только на поверхности. В иных же случаях и поверхность успевает остыть. Надо при этом заметить, что на высоте 10—25 км температура стратосферы достигает —57° С. Снаружи метеорит обычно покрыт со всех сторон черной «корой плавления».

Эффект, вызываемый ударом упавшего метеорного тела о земную поверхность, в общем ничтожен. Метеорит Гоба весом в 60 т образовал яму глубиной только в 1,5 м.

Упавшее на земную поверхность тело получает название *метеорита*. Полет метеорного тела всегда дает начало особым баллистическим волнам, распространяющимся в воздухе во все стороны от траектории летящего болида. Вследствие возникновения этой серии волн наблюдатель слышит при полете болида ряд грохочущих или даже громоподобных звуков, иногда напоминающих артиллерийскую стрельбу.

Метеориты служили, а иногда и теперь еще служат, предметом религиозного культа, например известный «черный камень», вделанный в стену Каабы (в Мекке), и др.

Падение на Землю исключительно крупных метеоритов происходит крайне редко. Однако сохранился ряд гигантских воронок, образованных падением огромных метеоритов в доисторические времена. Один из таких, наилучше обследованных метеоритных воронок, или кратеров, находится в пустыне Аризона (США). Его диаметр составляет 1,2 км, а глубина — 180 м. Валы кратера образованы скалами и камнями, выброшенными при взрыве метеорита при его ударе о каменные пласты. В окрестностях и на дне кратера найдено много осколков метеоритного железа.

Из очень больших метеоритов, выпавших за последние годы, следует упомянуть о гигантском Тунгусском метеорите, упавшем ранним утром 30 июня 1908 г. в глухой тайге между притоками реки Чуни и рекой Подкаменной Тунгуской (ныне Красноярский край).

Это падение произвело гигантскую катастрофу; при падении его на Землю произошло сильное землетрясение, которое отметили сейсмографы, и чрезвычайно сильный взрыв. Продукты взрыва были выброшены в высокие слои атмосферы. Горячая волна взрыва обожгла и повалила тайгу на площади радиусом в 10—15 км. Сильнейший ураган произвел большие разрушения в этом месте тайги: ни одного дерева там не осталось с неопаленной вершиной. Веко-

вая тайга лежит сплошными рядами (рис. 142), как «скошенная косой». Царское правительство не заинтересовалось этим явлением. Исследованием этого падения мы обязаны лишь смелому исследователю Л. А. Кулику, совершившему к месту падения четыре экспедиции, организованные Академией наук СССР. Энергия взрыва была колоссальная. Воздушная волна взрыва обогнула весь земной шар. В момент падения были слышны звуки, подобные раскатам пушечной стрельбы из сотен орудий. Массу Тунгусского метеорита акад. В. Г. Фесенков оценил приблизительно



Рис. 142. Район падения Тунгусского метеорита

в 1 млн. *t*, если скорость его принять равной 60 км/сек. Вся эта масса расплылась при ударе и в почве остались лишь микроскопические частицы метеорита.

Другой крупный метеорит, так называемый Сихотэ-Алинский, выпал 12 февраля 1947 г. около 10 час. утра по местному времени в Приморском крае, в тайге, в 500 км северо-восточнее Владивостока. Его полет наблюдался на протяжении громадной площади в радиусе нескольких сот километров. Летящий «огненный» шар был так ярк, что предметы стали отбрасывать вторичные тени. За 4 года, прошедших со времени падения Сихотэ-Алинского метеорита, на место его падения Академией наук СССР было организовано четыре экспедиции. В результате продолжительных полевых работ было обнаружено до 100 воронок различных размеров

и глубины (некоторые доходили до 28 м в диаметре и 6 м глубины), разбросанных на площади примерно в 1 кв. км. Всего было собрано



Рис. 143. Раскопки одного из кратеров Сихотэ-Алинского метеорита

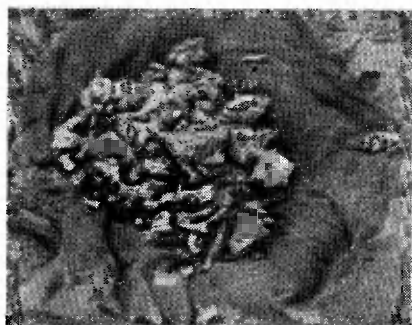


Рис. 144. Осколки из кратера Сихотэ-Алинского метеорита

несколько сотен отдельных осколков метеорита, причем некоторые извлекались при помощи лебедок глубоко из-под земли (присутствие их под землей обнаруживалось при помощи миноискателей, так как метеорит был железный). В 1950 г. на поверхность Земли был извлечен осколок весом в 1745 кг. Это — самый крупный метеорит в СССР. Вес всего метеоритного вещества, собранного в настоящее время на месте падения Сихотэ-Алинского метеорита, достигает 37 т. Сихотэ-Алинский метеорит — единственный в мире, условия падения которого подверглись столь тщательному изучению, так как только в нашей стране прилагается столько усилий для развития науки.

В настоящее время можно считать установленным, что влетевший в феврале 1947 г. в земную атмосферу метеорит представлял собой тело весом около 1500 т. Он состоял из железа (93%) и никеля (5%) с незначительными примесями других элементов. Указанный вес соответствует объему железного шара диаметром приблизительно в 8 м. При своем полете в земной атмосфере на определенной высоте (около 7 км) он рассыпался на отдельные куски, только часть которых упала на Землю, большая же часть должна была испариться.

В СССР метеориты объявлены государственной собственностью, и каждый, кто видел падение метеорита или нашел его,

должен уведомить об этом Комитет по метеоритам Академии наук СССР или ближайшую астрономическую обсерваторию или отделение Всесоюзного астрономо-геодезического общества.

На Землю падают и очень мелкие пылинки, и более крупные тельца. За сутки на земную поверхность выпадает около 10 т метеоритного вещества. Следовательно, должно наблюдаться постепенное увеличение момента инерции Земли, что должно повлечь за собой постепенное замедление скорости вращения Земли вокруг оси. Однако, судя по подсчетам К. Л. Баева, продолжительность земных суток должна была бы постепенно увеличиваться, вероятно, менее чем на 0,001 секунды за один миллиард лет.

§ 137. Химический состав метеоритов. Все упавшие на земную поверхность метеориты состоят главным образом из железа, кислорода, кремния и магния (составляющих в общем 92,4% по весу).

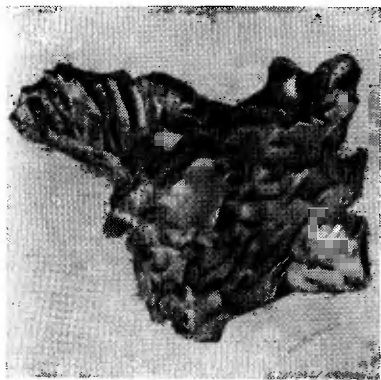


Рис. 145. Железный метеорит



Рис. 146. Каменный метеорит

Затем в них входят: никель, сера, алюминий и кальций, составляющие еще 6,3%.

Таким образом, на остальные химические элементы приходится только 1,3%. Следует отметить, что ни одного нового химического элемента во всех весьма тщательно проводимых химических анализах метеоритов обнаружено не было. Этим подтверждается одно из основных положений диалектического материализма — о материальном единстве Вселенной.

По своему строению метеориты разделяются на два класса: 1) *железные* (или сидериты; рис. 145) и 2) *каменные* (рис. 146). В свою очередь из этих двух основных классов можно выделить две группы — железо-каменных и каменно-железных метеоритов. Каменные метеориты разделяются на два класса — *хондриты* и *ахондриты*, причем все хондриты всегда содержат маленькие круглые шарики, называемые хондрами; в ахондритах их нет. Хондры — совершенно особые образования, отсутствующие в земных породах. Наконец, следует отметить еще группу стеклянных метеоритов —

тектитов; эта группа занимает какое-то особое промежуточное положение между земными породами и метеоритами.

Из минералов, составляющих главную массу каменных метеоритов и отчасти железных, следует отметить никелистое железо, оливин и другие. При травлении азотной кислотой полированных поверхностей метеоритов выступают характерные фигуры Видманштеттена (рис. 147).

На основании изучения строения метеоритов пришли к выводу, что они должны были образоваться при отсутствии воздуха и воды, а кроме того, часто в условиях слабого поля тяготения. Все это наводит на мысль, что причинами образования метеоритов являются какие-то космические катастрофы.

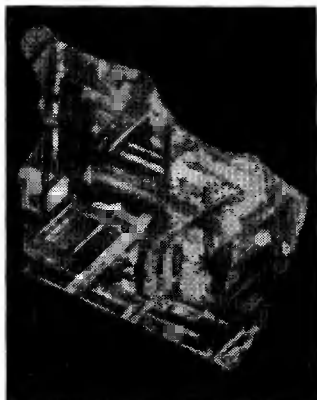


Рис. 147. Фигуры
Видманштеттена

§ 138. Метеорные потоки и их радианты. Потоки, связанные с кометами. Метеоры, как видимые простым глазом, так и телескопические, могут быть разделены на *спорадические*, иначе говоря единичные, метеоры и *периодические*, вылетающие из определенной площади на небесном своде, называемой *площадью радиации*. Явление радиации — чисто перспективное, так как траектории метеорных тел одного потока почти параллельны, и точка их видимого схождения называется точкой радиации, или радиантом.

Для определения радианта на звездную карту (составленную в так называемой *гномонической* проекции, в которой все дуги больших кругов изображаются прямыми линиями) наблюдателем наносятся, как это сделано на рисунке 148, видимые пути отдельных метеоров по небу. Продолжая эти пути назад до их взаимного пересечения, мы и определим положение радианта на небе. Какой-либо радиант всегда указывает на ту площадку неба, откуда метеоры вылетают только в определенные периоды времени. Следовательно, при существовании радианта мы имеем дело исключительно с периодическими метеорами, что вызвано, очевидно, встречами Земли с каким-нибудь определенным метеорным роем. Под действием силы солнечного тяготения метеорные тела, выделившиеся из какой-либо кометы, в конце концов должны растянуться по всей орбите, описываемой данным роем, и постепенно образовать как бы эллиптическую ленту метеорных тел, заполняющую всю орбиту, иначе говоря, — эллиптическое метеорное кольцо. При встречах Земли с таким кольцом в определенные дни года, очевидно, должен происходить вылет метеоров из одной и той же площадки неба. Сказанное поясняет рисунок 149, на котором изображены орбиты потоков персеид и леонид: радиант первого лежит в созвездии Персея,

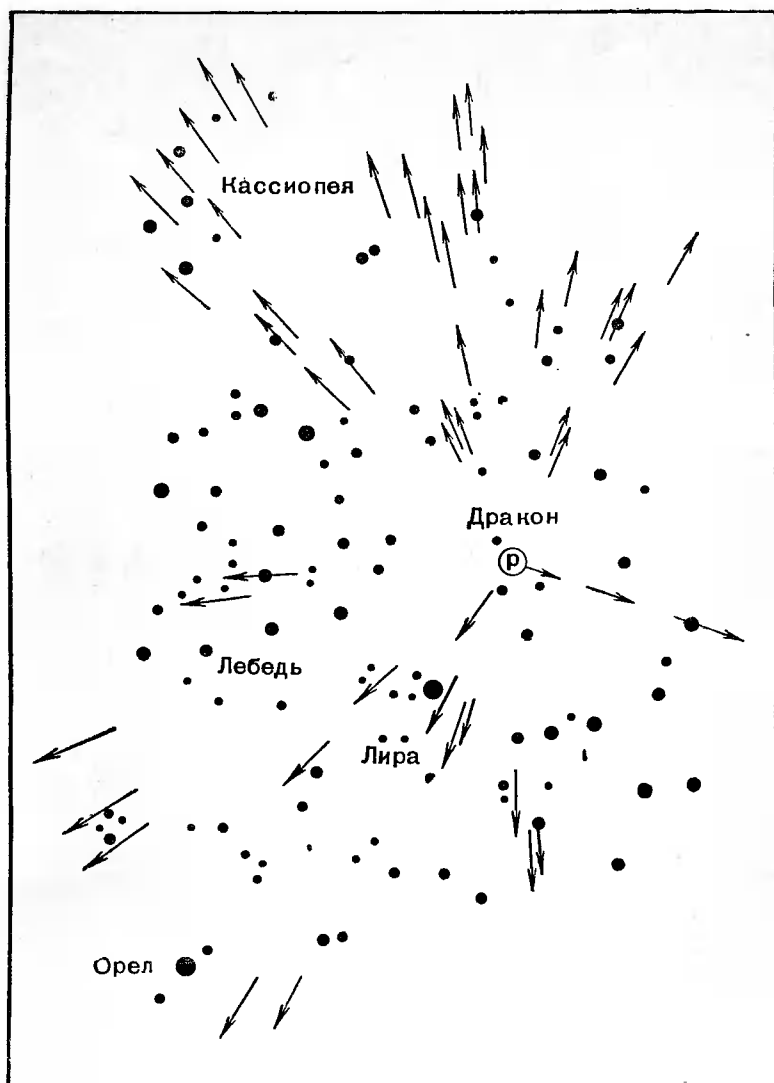


Рис. 148. Радиант метеорного потока драконид

а второго — в созвездии Льва, откуда и произошли названия потоков.

Наблюдениями установили, что леониды отличаются от персеид очень резко выраженным максимумом своей «напряженности». Поток леонид движется вокруг Солнца по замкнутой орбите, которую Земля теперь пересекает ежегодно 16 ноября, но эта точка пересе-

чения обеих орбит вследствие непрерывного изменения элементов орбиты леонид подвигается «вперед» на $52''$ в год.

Метеорный поток леонид не распределен равномерно вдоль всей своей орбиты, а особенно уплотнен на протяжении примерно $\frac{1}{15}$ части своей орбиты, образуя на этом пространстве нечто вроде густого и плотного облака метеорных тел. Это очень хорошо объясняет тот замечательный факт, что в день встречи Земли с наиболее густой его частью действительно наблюдались чрезвычайно обильные «дожди» падающих звезд, или, как выражаются иногда, «звездные дожди». Такие дожди наблюдались в 1799 г. и в 1833 г., а затем в 1866 г.

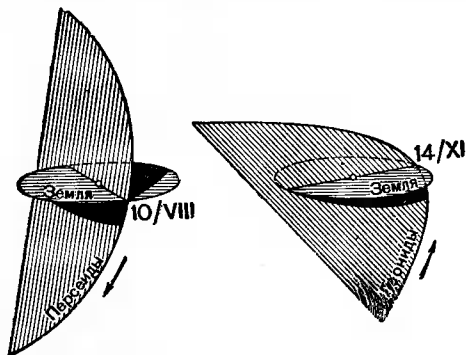


Рис. 149. Орбиты персеид и леонид

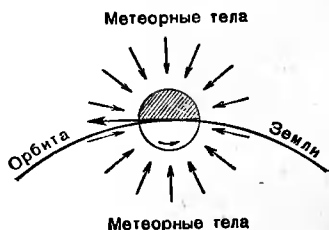


Рис. 150. Земля среди метеорных тел

Число наблюдаемых метеоров к утру увеличивается. Это объясняется очень просто: на рисунке 150 большая стрелка изображает направление движения Земли в пространстве. Легко видеть, что число метеорных тел, попадающих в земную атмосферу в определенное время, будет зависеть от относительной скорости Земли и самих метеоров. Земля несется в пространстве, как гигантский космический корабль; «нос» этого космического корабля — та часть Земли, где наступает утро. Следовательно, именно в утренние часы с Землей должно сталкиваться наибольшее количество метеоров. Кроме того, «утренние» метеоры обладают большей относительной скоростью, чем «ночные».

Всего в настоящее время насчитывается до 1200 метеорных потоков, но хорошо изучено всего 10—15 наиболее обильных. Обычно они называются по имени того созвездия, в котором лежит их радиант, а некоторые — по названию кометы, породившей этот поток. Так, кроме персеид и леонид, имеются потоки геминид, акварид, драконид и т. д.; с другой стороны, имеются потоки биэлид (от названия кометы Белого, или Биэлы) и др.

В конце XIX в. итальянский астроном Скиапарелли показал, что «падающие звезды» движутся по орбитам, почти в точности совпадающим с орбитами некоторых определенных комет. Так, орбита яркой августовской кометы 1862 III оказалась вполне иден-

тичной с орбитой тех метеорных тел, которые известны в настоящее время под именем августовских «падающих звезд», или персеид (их падение наблюдается ежегодно в первой половине августа). Ноябрьский рой метеорных тел (поток леонид) движется по орбите, совпадающей с орбитой кометы 1866 I. Сопоставление элементов леонид и кометы 1866 I приведено в таблице 9.

Таблица 9

Элементы	Леониды	Комета 1866 I
Прохождение через перигелий . . .	Ноябрь 10,09	Январь 11,16
Долгота перигелия	56°26'	60°28'
Долгота восходящего узла	231°28'	231°26'
Наклонение	17°44'	17°18'
Эксцентриситет	0,905	0,905
Перигелийное расстояние	0,987	0,976
Время обращения (в годах)	33,25	33,18
Движение	Обратное	Обратное

Исследуя вопрос о выделении кометами метеорных роев. Ф. А. Бредихин пришел к выводу, что метеорные тела будут двигаться, вообще говоря, по орбитам, образующим пучок, расходящийся к перигелию. Значительная величина площади радиации периодических метеоров позволила Бредихину заключить, что пути метеоров не параллельны между собой, как полагал Скиапарелли, принимавший радиант за точку, а наклонены друг к другу в пространстве и что время обращения отдельных метеорных роев различно. Эти взгляды Бредихина нашли себе подтверждение при изучении и обработке наблюдений биэлид и других метеорных потоков.

Метеорный поток, связанный с кометой Белого (Биэлы), явился причиной очень обильного «звездного дождя», наблюдавшегося 27 ноября 1872 г.

Наблюдения дали числа метеоров, выпадавших в течение часовых промежутков, как это указано в таблице 10.

Таблица 10

Среднее время	18—19	19—20	20—21	21—22	22—23
Север	182	1866	2777	1903	782
Юг	254	1780	2251	1099	601
Восток	280	1865	2729	1313	616
Запад	210	1780	2273	1411	803
Всего	926	7590	10030	5726	2802

Всего же за время от 18 до 3 час. утра наблюдалось 29 486 метеоров. Следует заметить, что указанный обильный «звездный дождь» наблюдался как раз в день встречи Земли с кометой Белого (Бизэлы); он повторился опять во время следующей встречи Земли с метеорным роем биэлид 27 ноября 1885 г.

Из других метеорных потоков, связанных с кометами, следует отметить: 1) поток майских акварид (наблюдается в начале мая), связанный с кометой Галлея; 2) поток понс-виннекид, связанный с кометой Понса — Виннеке; 3) поток геминид с радиантом в созвездии Близнецов, по-видимому, связанный с большой кометой 1680 г., и др.

Для наблюдения метеоров в последнее время применяется совершенно новый метод использования радиолокационных установок, дающий возможность отмечать появление метеоров даже при облачном небе днем и определять расстояния до них. Первый удачный опыт этого был осуществлен нашими исследователями метеорных потоков при наблюдении «звездного дождя» в октябре 1946 г. Применение радиолокации значительно расширяет возможность исследования метеорных тел. Изучение метеоров составило видный пункт в программе проведения Международного геофизического года 1957—1958 гг.

В наблюдениях метеоров, требующих многих наблюдателей одновременно и в разных местах, весьма велика роль астрономов-любителей. По своей доступности такие наблюдения могут производиться в школе и быть одним из предметов занятий в астрономических кружках молодежи. Русские любители астрономии, в особенности в советское время, собрали большой наблюдательный материал. Здесь нужно отметить Коллектив наблюдателей Московского отделения Всесоюзного астрономо-геодезического общества (ВАГО), который не только собрал много наблюдений, но и выполнял ценные работы по обработке их. Некоторые члены этого коллектива стали впоследствии известными советскими астрономами.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

СОЛНЦЕ

§ 139. Значение изучения Солнца. Солнце — основной источник всех движений и жизни на Земле. Постоянно совершающийся круговорот воды и воздуха, текущие реки, используемые в мощных электростанциях, запасы энергии в каменном угле и нефти, мир растений и животных — все это обязано своим происхождением действию солнечных лучей. Сам человек, по меткому выражению нашего знаменитого физиолога растений К. А. Тимирязева, вправе величать себя сыном Солнца.

Исключительное значение солнца для жизни на Земле чувствовалось человеком еще на первых ступенях роста его сознания и отражалось в древних религиях в виде культа бога Солнца (Ра — у египтян, Митра — у персов, Ваал — у финикийян, Феб-Апполон — у греков, Яр или Ярило — у наших предков славян и т. д.). Пережитки обожествления и олицетворения сил природы мы находим и во всех современных религиях.

Главные религиозные праздники, несомненно, имеют связь с явлениями годичного видимого движения Солнца. Так называемое «рождество» (25 декабря), праздник, заимствованный христианством из других, более древних религий, связан с тем поворотным моментом в положении Солнца, который относится к зимнему солнцестоянию и праздновался как бы рождение бога Солнца. Еще резче обнаруживается эта связь в весеннем празднике пасхи — этом празднике умирающего и воскресающего бога, фигурировавшем в тех или других видоизменениях почти во всех религиях, разделенных во времени тысячелетиями и территориально целыми полушариями (после открытия Америки и у ее обитателей были найдены религии со страдающим, умирающим и воскресающим богом). Праздник этот, определяемый по весеннему равноденствию, был связан у земледельческих и пастушеских народов с их весенними полевыми работами, оживлением всей природы от зимнего оцепенения.

Задачей педагога является ведение неослабной борьбы со всякими предрассудками и пережитками капитализма в сознании людей на основе правильных научных представлений.

Только научные исследования Солнца дают нам понимание всех связей земных явлений с солнечной деятельностью и пролагают пути использования солнечной энергии во всех ее формах. Эти исследования имеют большое значение для разрешения многих вопросов в практике строительства коммунизма в СССР.

Изучение Солнца в высшей степени важно еще и потому, что Солнце по своей природе представляет собой то же, что и звезды, но оно к нам несравненно ближе, чем все звезды, а потому исследование Солнца позволяет уяснить процессы, происходящие на звездах.

Исследование Солнца помогает нам лучше узнать и состав Земли. Ярким примером этого является открытие гелия прежде всего в спектре Солнца, а потом уже и на Земле. В особенности же важно изучение Солнца для атомной физики, стоящей в центре исследований современных физико-химических наук, вследствие того, что материя на Солнце находится в условиях температур и давлений, которые недоступны в земных лабораториях.

§ 140. Особенности методов исследования Солнца. Ввиду большого количества света и тепла, концентрирующегося в фокусе телескопа, Солнце невозможно наблюдать, смотря просто в окуляр (можно повредить глаз), как наблюдаются остальные светила. Чтобы наблюдать общий вид Солнца без мелких подробностей, лучше всего получить изображение его на экране, пристроенном к окулярной части, перпендикулярно к оптической оси ее, как это видно на рисунке 151. На экране получается изображение Солнца, размер которого зависит от увеличения окуляра, а также от расстояния экрана от окуляра. Чтобы несколько затенить экран, на объективный конец трубы надевают кусок картона или легкой фанеры и защищают экран от света со стороны.

Большинство современных аппаратов, предназначенных для изучения Солнца, имеют довольно сложное устройство и громоздки. Чтобы такой аппарат оставался неподвижным, необходимо иметь неизменно направленным на него при суточном вращении Земли солнечный луч. Это достигается при помощи так называемого целостата (рис. 152). Целостат представляет собой плоское зеркало на параллактической установке, могущее вращаться около оси, лежащей в его плоскости и параллельной земной оси, при помощи часового механизма, но со скоростью одного полного оборота не в 24, а в 48 часов (надо иметь в виду, что при изменении угла наклона зеркала луч изменяет свое направление на двойной угол). Установка целостата упрощается тем, что вводится второе плоское зеркало, которое помещается в точке пересечения отраженного

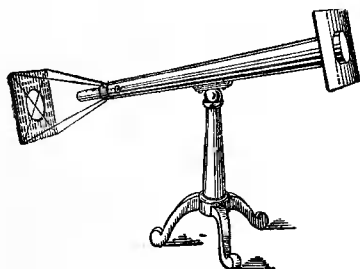


Рис. 151. Получение изображения на экране

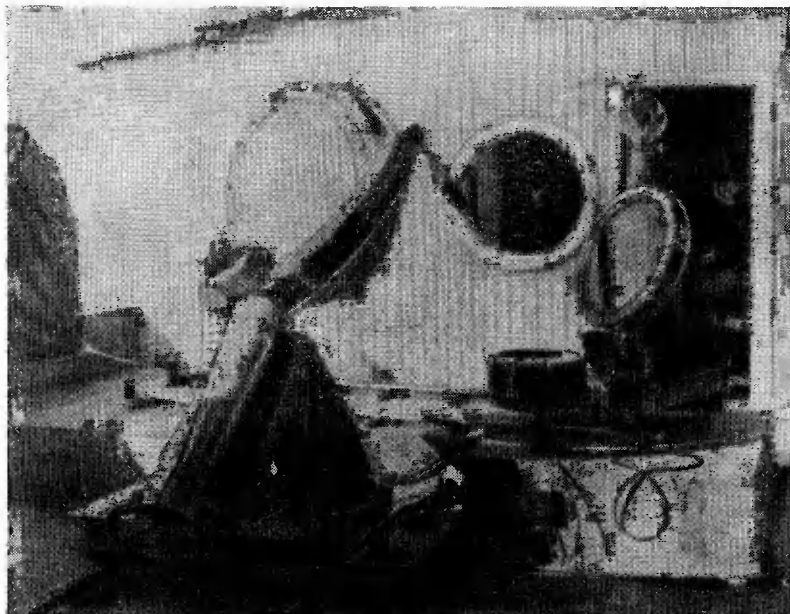


Рис. 152. Целостат Пулковской обсерватории



Рис. 153. Целостат перед объективной частью стандартного коронографа

от первого зеркала луча и оптической оси инструмента. Отсюда луч и направляется в объектив. Самый аппарат для фотографирования или спектрографирования помещается на постоянной установке в закрытом павильоне.

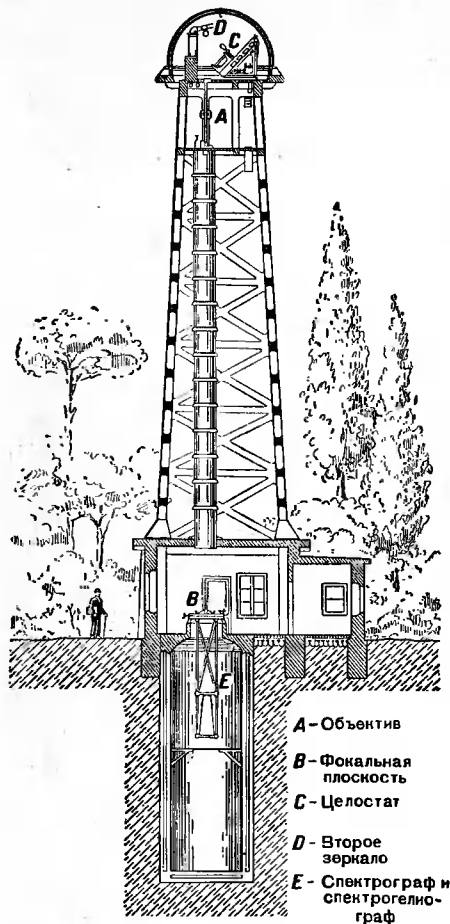


Рис. 154. Схема башенного телескопа

Специально для исследования Солнца строятся так называемые башенные телескопы (рис. 154). Оптическая ось такого телескопа направлена вертикально, неподвижный объектив находится вверху, а аппарат для фотографирования внизу, на дне шахты, где достигается не только большая устойчивость, но и постоянство температуры. Лучи от Солнца направляются в объектив при помощи целостата.

В СССР ведутся специальные работы по изучению Солнца в Крымской астрофизической обсерватории, в Пулковской обсерватории, а также в Харькове, Киеве, Абастумани, Ташкенте и в специальной горной станции на Северном Кавказе.

Совершенно особые условия для исследования Солнца представляются во время полных солнечных затмений, когда приходится применять и особые методы наблюдений. В это время яркий диск Солнца закрывается темной и непрозрачной Луной, земная атмосфера в месте наблюдения оказывается не освещенной, и мы можем наблюдать

сравнительно более слабо светящуюся атмосферу Солнца. С другой стороны, продолжительность полного затмения не превосходит 8 мин., а обычно составляет 1—3 мин., и надо еще принять во внимание, что многие полные солнечные затмения бывают видны в местах, неблагоприятных для наблюдений. Чтобы в такое короткое время получить возможно больше наблюдательного материала, приходится проводить очень тщательную подготовку к затмению, строить специальные приборы, пригодные для экспедиционной пе-

ревозки, в то же время дающие возможность за очень короткий срок произвести максимальное количество операций.

Очень интересным и показательным в этом отношении было проведение работ, связанных с полным солнечным затмением 19 июня 1936 г. Это затмение проходило почти целиком по территории Советского Союза на протяжении 7200 км от Черного моря до Тихого океана. Для оборудования наблюдений был создан новый инструментарий, отвечающий современным проблемам изучения Солнца, целиком изготовленный на заводах и в институтах СССР.

Одной из задач было изучение движений и изменений во внешних оболочках Солнца за время $2\frac{1}{4}$ часа движения тени вдоль полосы затмения. Специально для этой цели было изготовлено 6 однотипных инструментов для фотографирования внешних областей Солнца — стандартных *коронграфов*, которые и были размещены в разных местах полосы полной фазы от Северного Кавказа до Дальнего Востока. Было получено 30 фотографий, давших ценные материалы.

Кроме того, экспедицией Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга была проведена работа, требующая большой точности, по проверке так называемого эффекта Эйнштейна. На основании общего принципа относительности световой луч, проходя вблизи большой массы, должен отклоняться от прямого пути в сторону этой массы.

Проверка эффекта Эйнштейна и была поставлена проф. А. А. Михайловым (ныне директор Пулковской обсерватории) во время затмения 1936 г., со специальной оригинальной установкой, сконструированной и изготовленной в СССР. За время полной фазы затмения, длившейся 138 секунд, было сделано несколько фотографических снимков области неба, окружающей Солнце вблизи него. А через 9 месяцев с того же места и тем же инструментом была вновь сфотографирована та же область неба, но уже без Солнца. Измерение фотопластинок привело к тому, что смещение звезд вблизи Солнца оказалось более значительным, чем полученное предыдущими экспедициями.

Каждое из последовавших полных солнечных затмений (1941, 1945, 1952, 1954, 1956 гг.), видимых на территории нашего Союза, было использовано многими советскими экспедициями для дальнейшего изучения явлений на Солнце. Были получены новые интересные результаты, а также подтвержден ряд результатов наблюдений в затмение 1936 г. и внесена в них большая ясность, например движения в короне, вращение ее и др.

§ 141. Расстояние, размеры и масса Солнца. При рассмотрении строения и движения солнечной системы (см. главу IV) мы уже ознакомились с методами определения расстояний и масс (см. главу VI) всех тел, ее составляющих. Там мы видели, что измерения точного горизонтального экваториального параллакса Солнца привели к значению $8'',80$. Отсюда следует, что среднее расстояние от Земли до Солнца составляет 149,5 млн. км, или 23 440 эквато-

риальных радиусов Земли. По самым же последним данным, параллакс Солнца $8'',79$, а среднее расстояние $149,67$ млн. км. Для наглядного представления об этом расстоянии можно заметить, что поезду, безостановочно идущему со скоростью 100 км/час, понадобится 170 лет, чтобы пройти такое расстояние; самолету, летящему непрерывно со скоростью 350 км/час, потребовалось бы около 50 лет. Звук, распространяющийся со средней скоростью 330 м/сек, прошел бы его в 14 лет, а ракета, летящая со средней скоростью 10 км/сек, — около полугода. Даже свету, имеющему наибольшую скорость, требуется $8^m 18^s$, чтобы дойти от Солнца до Земли. Вследствие эксцентриситета земной орбиты расстояние от Земли до Солнца колеблется в пределах приблизительно 5 млн. км.

Зная расстояние Солнца и видимый угловой диаметр солнечного диска, который может быть непосредственно измерен, легко определить размеры Солнца. Средняя величина его равна $31'59'',3 \pm \pm 0'',1$ (около $32'$). Действительный диаметр Солнца оказывается равным $1\,391\,000$ км, т. е. в 109 раз больше диаметра Земли. Отсюда следует, что поверхность Солнца приблизительно в $12\,000$ раз больше поверхности Земли, а объем Солнца в $1\,300\,000$ раз больше объема Земли и почти в 1000 раз больше объема самой большой планеты — Юпитер. Если взять сумму объемов всех планет, то объем Солнца превысит ее почти в 600 раз.

Существует ряд методов, которыми может быть определена масса Солнца. Один из них тот, которым определяются массы планет на основании третьего уточненного закона Кеплера. Можно подойти также к определению массы Солнца, учитывая среднее ускорение Земли при ее движении по орбите. Все способы дают для отношения массы Солнца к массе Земли приблизительно число $333\,000$. Более точное значение массы Солнца составляет $1,99 \cdot 10^{33}$ г. Эта масса в 745 раз превосходит массу всех планет, вместе взятых. Таким образом, $99,86\%$ всей массы солнечной системы сосредоточено в Солнце и только $0,14\%$ — в планетах, спутниках и пр.

Так как объем Солнца в $1,3$ млн. раз больше объема Земли, а масса — в 333 тыс. раз больше, то средняя плотность Солнца составляет всего $0,255$ (в 4 раза меньше) средней плотности Земли и равна $1,41$ по отношению к воде.

Нетрудно вычислить ускорение силы тяжести на поверхности Солнца по сравнению с земным: $g_{\odot} = 333\,000 : 109^2 \approx 28$, т. е. в 28 раз больше, чем на Земле. Если ускорение силы тяжести на Земле в среднем равно $9,81$ м/сек.², то на Солнце оно составляет 275 м/сек.².

§ 142. Общий вид Солнца. Вращение его. Солнце в телескоп имеет вид неравномерно яркого диска с некоторым потемнением к краям (рис. 155). Это указывает на то, что Солнце представляет собой шар и над слоем его, испускающим яркий свет и называемым *фотосферой* (рис. 156), находится довольно высокая *атмосфера*, температура которой заметно ниже.

Надо заметить, что слои Солнца, находящиеся над фотосферой, значительно отличаются от того, что представляет собой земная

атмосфера: они сами излучают, что и наблюдается при затмениях. Лучи Солнца, идущие от середины солнечного диска, видимо, исходят из более глубоких и соответственно более горячих слоев Солнца, чем лучи, соответствующие краям. Можно было бы ожидать, что

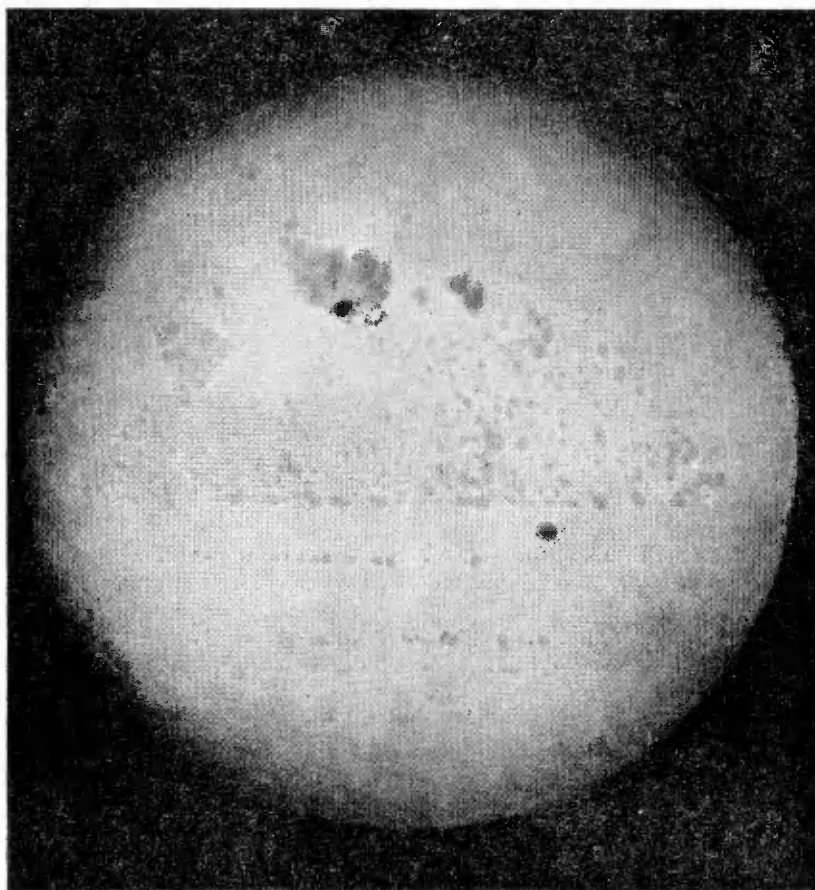


Рис. 155. Общий вид Солнца

края солнечного диска должны представляться «размытыми», а они оказываются довольно резко очерченными. Но, учитывая увеличение непрозрачности солнечных газов с глубиной, можно рассчитать, что толщина размытости не должна превышать сотни километров, что соответствует видимому угловому расстоянию порядка $0'',1$. Эта величина неразличима в телескоп.

При достаточном увеличении телескопа мы начинаем замечать, что атмосфера не является равномерно яркой, а обнаруживает зер-

нистую структуру: она как бы состоит из бесчисленного количества мелких ярких пятнышек, похожих на рисовые зерна и называемых гранулами, которые то возникают, то пропадают и движутся

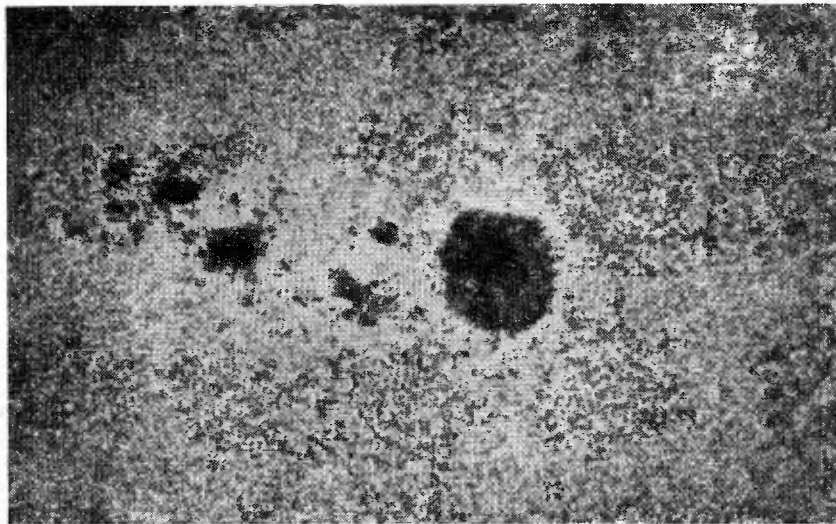


Рис. 156. Фотосфера с грануляцией и пятнами

по разным направлениям на более темном фоне. Такой вид поверхности фотосферы носит название *грануляции* (рис. 157). Видимый размер гранул порядка $1''$, а значит, действительные размеры их на Солнце — порядка тысячи километров. Фотография, полученная пулковским астрономом А. П. Ганским еще в 1905 г., показывает довольно сложную и притом непостоянную структуру грануляции. Это явление на Солнце, как полагают в настоящее время, связано с тем, что более глубокие части фотосферы находятся в неустойчивом состоянии. Горячие массы газа поднимаются из глубины к поверхности фотосферы, несколько охлаждаются и опускаются, а на смену им поднимаются новые. Это своего рода конвекционные токи в фотосфере.

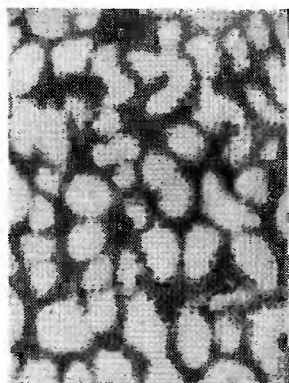


Рис. 157. Грануляция
(фотография
А. П. Ганского)

Кроме грануляции, на солнечном диске весьма часто можно видеть темные и светлые образования более значительных размеров и особой структуры — это *солнеч-*

ные пятна и факелы. Они также представляют собой изменчивые явления, но существование их на Солнце может продолжаться днями, а в отдельных случаях — даже месяцами.

Во время полных солнечных затмений, когда темный диск Луны загораживает фотосферу, можно заметить внешние, более слабо светящиеся слои Солнца. В это время становится видимым как бы розоватый ободок вокруг фотосферы — *хромосфера*, из которой местами выделяются так называемые *выступы*, или *протуберанцы*. Хромосферу окружает обширная, нежного жемчужно-белого цвета *корона*, представляющая собой внешние, чрезвычайно разреженные области солнечной атмосферы, отдельные лучи которой простираются на 1—2, а иногда и до 3—4 диаметров Солнца.

Систематические наблюдения над пятнами привели к установлению факта вращения Солнца вокруг оси и позволили определить истинный, или сидерический, период вращения, составляющий около 25 суток вблизи экватора.

Направление вращения совпадает с направлением движения планет около Солнца, т. е. против стрелки часов, если смотреть с северного полюса эклиптики.

Видимый с Земли, или синодический, период вращения Солнца дня на два длиннее (около 27 суток) вследствие движения самой Земли. Видимые пути пятен несколько различны вследствие наклона оси вращения Солнца к плоскости эклиптики и вращения Земли около Солнца: в декабре и июне движение пятен кажется прямолинейным, в промежутках же — весной — путь пятен обращен выпуклостью к северу, а осенью — к югу (рис. 158). Плоскость солнечного экватора наклонена к плоскости эклиптики под углом около 7° .

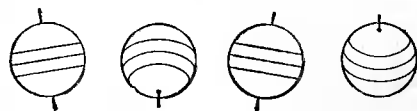


Рис. 158. Различные положения Солнца относительно Земли

Теперь определяют период вращения Солнца и другими способами. Одним из таких способов является применение принципа Доплера — Физо, позволяющего определить лучевые скорости приближающегося к нам одного края Солнца и удаляющегося другого края; отсюда по известным размерам Солнца можно вычислить период вращения. Подобные систематические наблюдения вращения Солнца проводились в Пулковке под руководством акад. А. А. Белопольского.

Все способы подтвердили тот факт, что период вращения Солнца различен для разных гелиографических¹ широт: на экваторе период составляет 25 дней, а с увеличением широты он правильно возрастает. Это значит, что угловая скорость к полюсам умень-

¹ *Гелиографическая* широта и долгота — координаты, определяющие положение точки на поверхности Солнца по отношению к солнечному экватору и некоторому условному начальному меридиану аналогично *географическим* координатам на поверхности Земли.

шается, а к экватору увеличивается, т. е. имеет место так называемое экваториальное ускорение. Средние величины угловых скоростей и периодов вращения, соответствующие разным гелиографическим широтам, по различным наблюдениям солнечных пятен сопоставлены в таблице 11.

Таблица 11

Гелиографическая широта	Угловая скорость	Период вращения
0°	14°,40	25 ^д ,0
10	14,31	25,2
20	14,06	25,6
30	13,69	26,3
40	13,23	27,2

На основании спектральных наблюдений можно сказать, что на гелиографической широте 60° период вращения превышает 30 суток, а у полюса доходит до 35 суток.

Все это приводит к заключению, что Солнце вращается отнюдь не как твердое тело.

Причина существующего на Солнце различия во вращении разных зон еще в достаточной степени не выяснена. Полагают, что эти различия возникли в результате уплотнения Солнца. Последние исследования показали, что уменьшение угловой скорости вращения по направлению к полюсам Солнца относится главным образом к верхним слоям Солнца.

Внешняя фигура Солнца очень близка к точному шару.

§ 143. Спектр Солнца и состав солнечной атмосферы. Самые важные сведения о природе Солнца получены путем изучения солнечного спектра. Начало изучения солнечного спектра положено Фраунгофером (1814), который открыл в нем ряд темных линий, получивших название фраунгоферовых. Но только Кирхгоф (1861) отождествил ряд этих линий как линий поглощения со светлыми линиями земных источников света. Он же ввел обозначение наиболее интенсивных спектральных линий буквами А, В, С, D, Е, F. В 1868 г. Ангстрем применил дифракционную решетку и составил атлас так называемого нормального солнечного спектра со шкалой линий, выраженных в длинах волн. Особенно же сильно изучение солнечного спектра подвинулось, когда Роуланд издал свой большой спектральный атлас (1891), представляющий увеличение фотографическим путем спектрограммы Солнца, полученные при помощи дифракционной вогнутой отражательной решетки с фокусным расстоянием в 7 м. Разрешающая сила спектрографа была такая, что 1 Å соответствовал 3,3 мм (1 Å = 10⁻⁸ см). Для измерения длин волн за основу взята длина волны линии D₁ натрия (λ 5896 Å). Общая длина всего спектра в атласе получилась равной 13 м. Он охватывает область длин волн от λ 6953 (красная часть) до λ 2967 (ультрафиолетовая часть) и содержит 20 000 линий поглощения. Около трети этих линий еще сам Роуланд отождествил с линиями химических элементов, известных на Земле, и обнаружил присутствие во внешних слоях Солнца 36 таких элементов (водород, кальций, железо и др.) (рис. 159).

В течение 30—40 лет спектральный атлас Роуланда служил основой исследований солнечного спектра. Но дальнейшие работы как в отношении большей точности измерений длин волн, так и в отношении получения спектра с большей дисперсией привели к значительному уточнению солнечного спектра. За основу была взята красная линия кадмия, не разлагающаяся в самые сильные приборы на отдельные тонкие линии, которая была измерена при помощи интерферометра с точностью, превосходящей $0,001 \text{ \AA}$ (в стандартном метре длина волны красной кадмиевой линии содержится 1 553 164,13 раза).

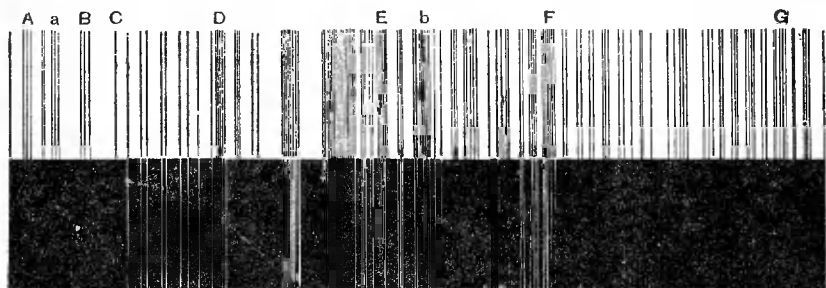


Рис. 159. Совпадение линий спектра Солнца (вверху) с линиями спектра железа (внизу)

На обсерватории Маунт Вильсон построены такие спектрографы, которые по своей разрешающей силе значительно превосходят существовавшие до сих пор. Дифракционная решетка, помещенная на дне башенного телескопа, дает дисперсию, при которой $1 \text{ \AA}$ соответствует 5 мм , так что вполне разделяются линии с разностью длин волн, равной $0,026 \text{ \AA}$.

Решением Международного съезда по исследованию Солнца был произведен пересмотр исследования Роуланда по определению длин волн спектральных линий Солнца, причем в основу положена красная линия кадмия. Таким образом, появились новые таблицы (1928) под названием «Пересмотр роуландовских предварительных таблиц длин волн солнечного спектра». Эти таблицы содержат длины волн от $\lambda 2975,483 \text{ \AA}$ до $\lambda 10\,218,6 \text{ \AA}$, т. е. захватывают ультрафиолетовую и инфракрасную части спектра Солнца. (Видимая часть спектра заключается между $\lambda 7\,600 \text{ \AA}$ и $\lambda 3\,800 \text{ \AA}$.) Данные новых таблиц доставили гораздо больший материал для суждения о химическом составе верхних слоев Солнца. Теперь можно считать отождествленными по крайней мере 62 из общего числа 92 химических элементов таблицы Менделеева и с уверенностью констатировать их наличие в солнечной атмосфере. Что касается остальных

30 элементов, то у 13 из них спектры еще мало изучены или совсем неизвестны. Ряд элементов (ртуть, цезий и др.) требует большой энергии возбуждения атомов или большого количества их для того, чтобы их линии в спектре стали заметны. Поэтому ряд элементов может присутствовать, но не обнаруживать себя в спектре. В 1943 г. были отождествлены спектральные линии золота, которое до того не обнаруживали на Солнце. Обнаружен также фосфор.

Вообще, если в спектре Солнца отсутствуют линии какого-либо элемента, то это еще не является доказательством того, что этот элемент действительно отсутствует на Солнце. Дело в том, что спектр элемента в большой степени зависит от физических условий, главным образом от температуры и давления. При некоторых же условиях наиболее выраженные линии элемента находятся далеко в ультрафиолетовой части, поглощаемой земной атмосферой, или в инфракрасной части, не получающейся на фотопластинке.

Различается спектр электрической дуги — это обычно спектр нейтральных атомов — и спектр электрической искры (более высокая температура) — спектр ионизированных атомов.

В итоге мы можем сказать, что подавляющее большинство земных элементов имеется на Солнце; в то же время на Солнце не найдено таких элементов, которых мы не знали бы теперь на Земле. Все это указывает на единообразие состава небесных тел, на материальное единство во Вселенной.

Современное учение о спектрах и строении атома дает возможность подойти к определению количественного содержания различных элементов в солнечной атмосфере. Установлено соотношение между интенсивностью спектральной линии и числом атомов, производящих эту линию. На основании этого оказалось возможным произвести вычисление количества частиц того или иного элемента в атмосфере Солнца над 1 см^2 .

Согласно новейшим исследованиям солнечная атмосфера более чем на 50% по массе состоит из водорода. Около 40% в ней составляет гелий и менее 10% приходится на долю прочих химических элементов. Среди них в первую очередь надо назвать кислород, а затем магний, азот, углерод, кремний, железо, кальций, натрий и др. Содержание элементов быстро уменьшается с возрастанием атомного веса. Из металлов на Солнце преобладают магний, железо, кальций, натрий. Если к этому еще прибавить кремний, то это как раз те самые элементы, которые наиболее обильны на Земле и в метеоритах.

Изучение явлений, происходящих на поверхности Солнца и сопровождающихся бурными перемещениями газовых масс солнечного вещества, обнаружение в хромосфере и протуберанцах наряду с легкими элементами и тяжелых металлов, а также соображения о процессах, происходящих в недрах Солнца, — все это указывает на большую вероятность непрерывного перемешивания солнечного вещества. Поэтому состав всего Солнца в целом не должен значительно отличаться от состава его наружных слоев.

Малое давление — порядка тысячных долей атмосферы — в нижних слоях указывает на чрезвычайную разреженность солнечной атмосферы.

§ 144. **Спектрогелиограф и спектрогелиоскоп.** Особенно много дало для спектрального метода исследования вещества на Солнце изобретение особого инструмента — *спектрогелиографа*, позволяющего выделить из общего солнечного света свет какого-либо одного химического элемента и изучать солнечную атмосферу по всему диску, а не только у края его. Дело в том, что фраунгоферовы линии не совсем темны: потемнение этих мест спектра зависит от степени поглощения света фотосферы данным газом, находящимся в более высоких слоях. Если получить через щель спектрального аппарата спектр Солнца на непрозрачном экране и в нем сделать узкий прорез (вторую щель) вдоль одной из спектральных линий, например водородной, а позади экрана поместить фотопластинку, то мы получим отпечаток линии водорода. Передвигая аппарат относительно изображения Солнца перпендикулярно щели и одновременно относительно фотографической пластинки, мы будем получать каждый новый снимок на новом месте пластинки. В результате получится сплошная фотография солнечной поверхности с распределением на ней водорода, т. е. фотография Солнца в монохроматических лучах.

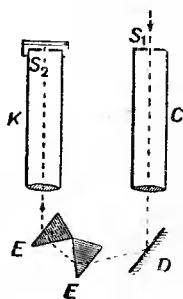


Рис. 160. Схема спектрогелиографа

На этом принципе построен спектрогелиограф, который пристраивается к телескопу, как и обыкновенный спектрограф (рис. 160). Луч из окулярной части телескопа проходит через щель S_1 и линзу коллиматора C . Зеркалом D он направляется в призмы E , где претерпевает преломление и разложение в спектр, получаемый в камере K . Вторая щель S_2 пропускает свет только определенной длины волны (например, $H\alpha$), воздействующий на фотографическую пластинку, помещенную позади S_2 . Для получения спектра может быть использована вместо призмы дифракционная решетка.

На том же принципе, что и спектрогелиограф, построен *спектрогелиоскоп*, позволяющий наблюдать глазом Солнце в свете той или иной спектральной линии (рис. 161). В спектрогелиоскопе обе щели сделаны быстро колеблющимися, сменяясь в более короткое время, чем задерживается в глазу зрительное впечатление. Это дает возможность обозревать состояние поверхности Солнца в определенных лучах и непрерывно следить за изменениями ее деталей, чего не достигается в спектрогелиографе. Такие инструменты имеются на ряде астрономических обсерваторий СССР.

При помощи спектрогелиографа можно не только выделить химические элементы, но и исследовать их распределение на разных уровнях солнечной атмосферы. Дело в том, что некоторые спектральные линии, как например линии кальция H и K, при очень боль-

шой дисперсии оказываются обращенными, т. е. на темном фоне такой довольно широкой линии выделяется в середине светлая линия, как бы разделяющая ее на две. Эта светлая линия в свою оче-

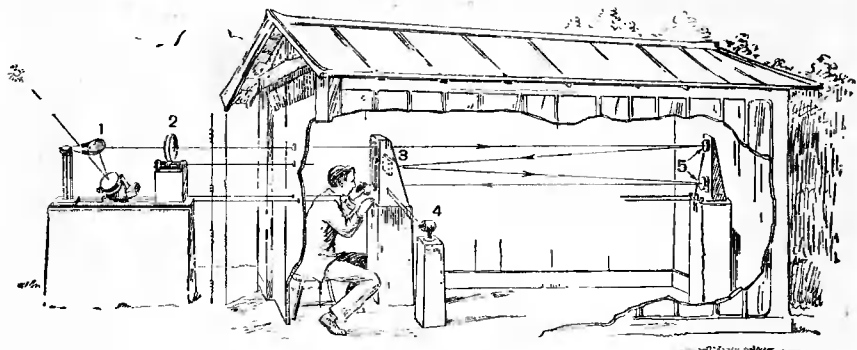


Рис. 161. Спектрогелиоскоп:

1 — целостат; 2 — линза; 3 — решетка; 4 — мотор; 5 — зеркало

редь оказывается обращенной, т. е. ее середину прорезывает еще тонкая темная линия (рис. 162). Широкая линия обозначается обыкновенно соответствующей буквой с индексом 1, например H_1 , светлая на ней — H_2 , тонкая темная посередине — H_3 . Это указывает на то, что линия H_1 принадлежит более мощным массам паров, находящихся в самых нижних слоях, линия H_2 — менее мощным, но более высоким слоям, поглощающим предыдущие лучи в некоторой части. Направляя щель спектрогелиографа с очень большой дисперсией на то или другое место на этой линии, мы будем исследовать распределение химического элемента на разных уровнях.

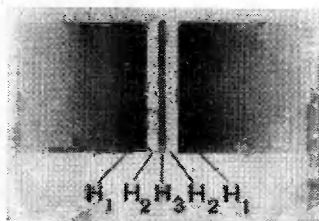


Рис. 162. Обращение линий в спектре Солнца

На рисунках 163 и 164 изображены спектрогелиограммы, снятые в лучах кальция и в лучах водорода. На рисунках видны разнообразные светлые и темные образования, которые называли *флоккулами*. Светлые флоккулы получаются от наиболее горячих масс газа, выпускаю-

щих сильный свет. Если же массы газа сравнительно холодны, но имеются в достаточном количестве, то, поглощая свет более низких слоев, они производят темные детали. Их очертания получаются несколько различными, смотря по тому, направлена ли узкая щель аппарата на центральную часть спектральной линии

или на края ее, т. е., иначе говоря, на газовые массы, находящиеся на разных уровнях. Очевидно, мы имеем в этом случае изображение как бы облаков кальция или водорода в их сечениях на разной высоте в солнечной атмосфере и можем проследить форму облака с высотой. Анализируя таким образом различные снимки,

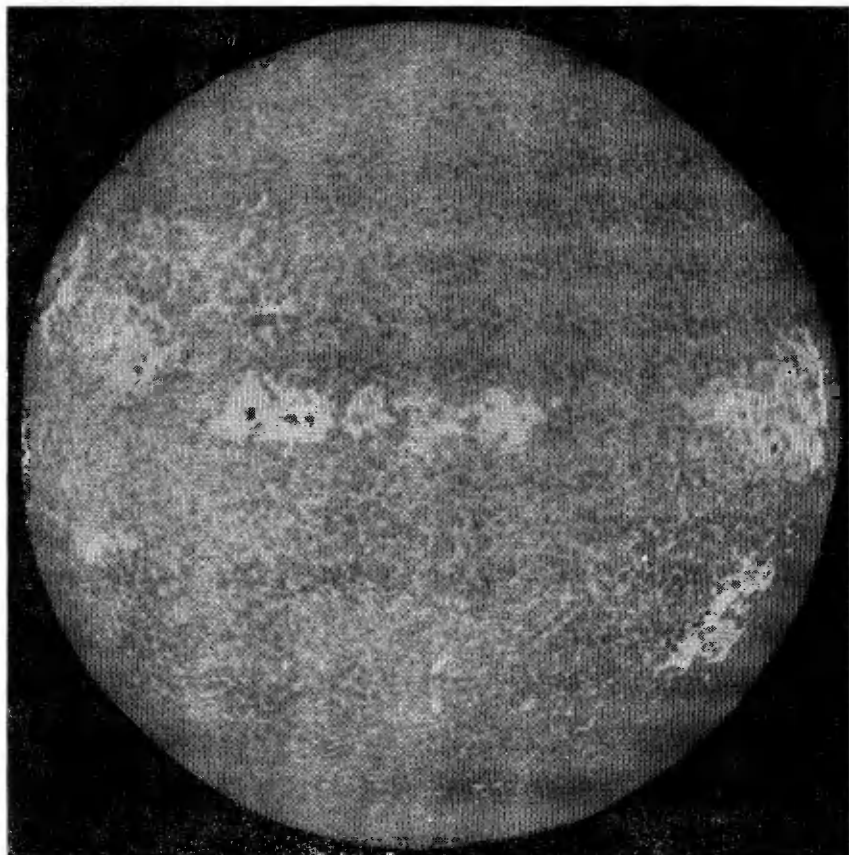


Рис. 163. Спектрогелиограмма в лучах кальция

Хэл нашел, что кальциевые облака имеют как бы столбообразную форму с расширением и большей яркостью вверху. Водородные спектрогелиограммы значительно отличаются по общему виду от кальциевых и относятся они, видимо, к более высоким уровням солнечной атмосферы. Темные водородные флоккулы распространены по всему диску Солнца; они большей частью вытянуты, почему и названы *волоконнами*. Они представляют собой, по-видимому, массы

водорода, высоко поднимающиеся над хромосферой, т. е. *протуберанцы*. Получались и исследовались также спектрогелиограммы в линиях других элементов, как например железо, натрий, магний. Они в общем напоминают кальциевые спектрогелиограммы (см. рис. 163).

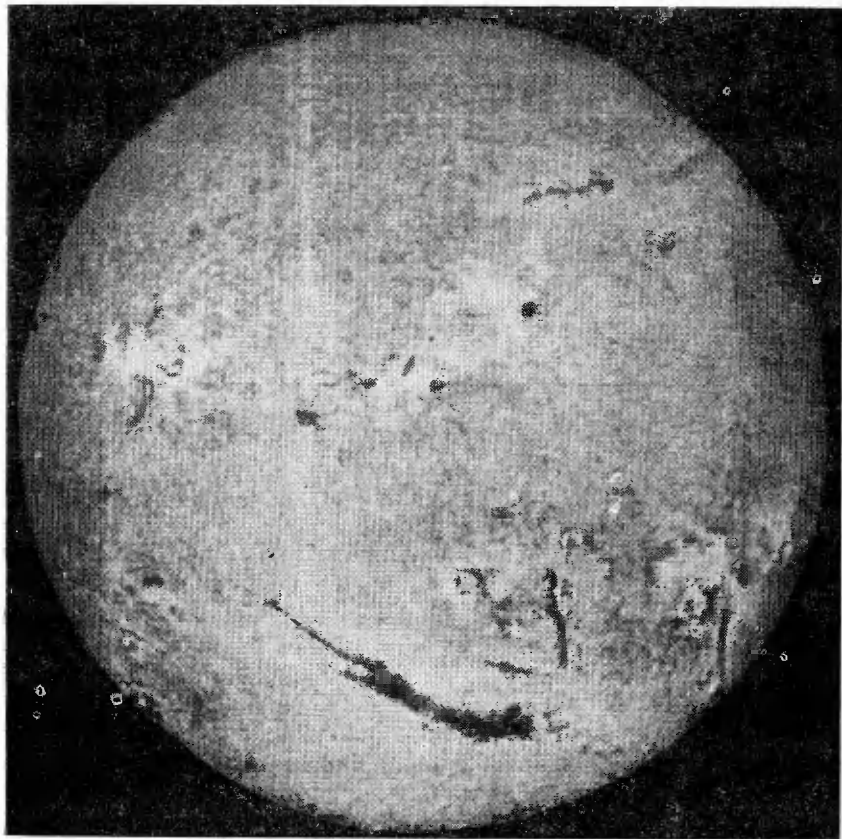


Рис. 164. Спектрогелиограмма в лучах водорода

§ 145. Температура Солнца. Исследование солнечного спектра в отношении распределения в нем энергии дает возможность вычислить температуру излучающей поверхности Солнца. При этом мы пользуемся законами излучения абсолютно черного тела. Определяемая таким образом температура близка к действительной температуре фотосферы. Это показано на рисунке 165, на котором по одной оси координат отложены длины волн, а по другой — величина энергии; кривая распределения энергии в спектре Солнца до-

статочны близка к кривой, построенной по формуле Планка для абсолютно черного тела.

Многочисленные фотометрические измерения в солнечном спектре привели к тому, что максимальная энергия соответствует в нем длине волны $\lambda_{\text{max}} = 4738 \text{ \AA}$. Это дает, согласно закону Вина, для абсолютной температуры Солнца 6080° К . При пользовании формулой Планка получается температура Солнца около 5900° К .

Абсолютная температура Солнца, определяемая по полному излучению его, как абсолютно черного тела, называется *эффективной температурой*. Эффективная температура Солнца может быть получена, исходя из того общего количества энергии, которое испускает Солнце в окружающее пространство. Количество всей энергии, приносимой на Землю солнеч-

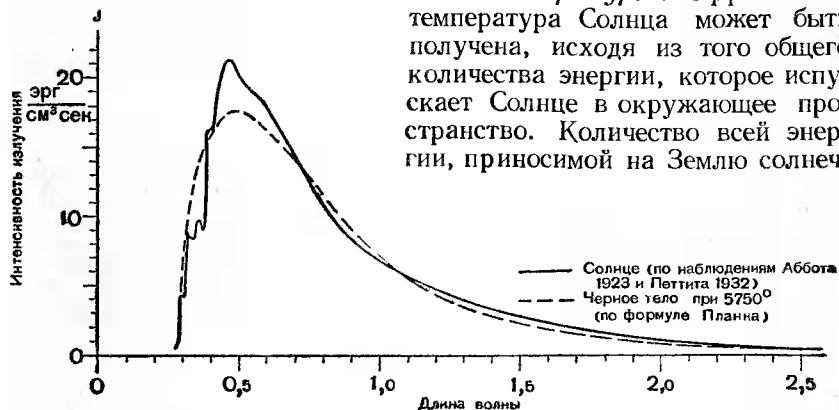


Рис. 165. Распределение энергии в спектре Солнца

ными лучами, определяется экспериментально. Мерой этой энергии служит так называемая солнечная постоянная.

Солнечная постоянная есть полное количество энергии, получаемое за одну минуту площадкой в 1 см^2 , перпендикулярной к солнечным лучам у предела земной атмосферы при среднем расстоянии Земли от Солнца.

При определении солнечной постоянной на практике приходится измерять количество энергии, получаемое прибором на поверхности Земли, и учитывать то количество энергии, которое поглощается атмосферой при прохождении через нее солнечных лучей. Это составляет большую трудность, так как поглощение зависит от многих условий, притом меняющихся. Кроме того, поглощение лучей разных длин волн различно. Поэтому одновременно с измерением общего количества энергии приходится при помощи болометра измерять интенсивность излучения в различных частях спектра Солнца, чтобы учесть поглощение лучей отдельных длин волн.

Первые измерения общего количества солнечной энергии производились при помощи *актинометров*. Широкое применение имел, например, водоструйный актинометр, сконструированный физи-

ком В. А. Михельсоном. В нем солнечные лучи, пройдя через ряд диафрагм *A, B, C*, вступают во внутреннюю полость приемника и там целиком поглощают, нагревая воду, циркулирующую по змеевику. Внутри змеевика при входе и выходе струи воды помещенные там платиновые проволочки служат для измерения температуры при изменении электрического сопротивления. Вся приемная часть во избежание потерь тепла наружу заключена в дьюаров сосуд.

На основе термоэлектрического метода измерений построены также актинографы, служащие для непрерывной записи напряженности солнечной радиации. В СССР определения солнечной постоянной очень успешно велись в Слуцке (близ Ленинграда) Н. Н. Калитиным.

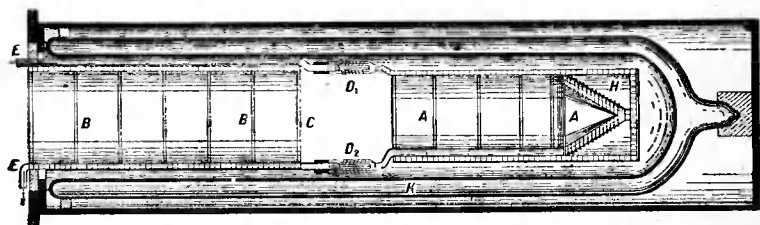


Рис. 166. Водоструйный актинометр

По последним измерениям, средняя величина солнечной постоянной около $2 \frac{\text{м. кал}}{\text{см}^2 \cdot \text{мин}}$. Наглядно эту величину можно представить тем, что отвесные солнечные лучи могли бы расплавить слой льда на поверхности Земли толщиной около 1,5 см в течение 1 часа.

В абсолютной системе механических единиц солнечная постоянная выражается числом $1,35 \cdot 10^6 \text{ эрг/сек} \cdot \text{см}^2$. Отсюда мощность солнечного излучения, падающего на 1 м^2 , составляет 1,81 л. с. На весь земной шар излучается поток энергии, равносильный двигателю в 231 биллион лошадиных сил ($2,31 \cdot 10^{14} \text{ л. с.}$).

Зная количество солнечной энергии, улавливаемое 1 см^2 на среднем расстоянии от Земли до Солнца, легко вычислить полное количество энергии, излучаемое Солнцем. Для этого нужно представить себе сферическую поверхность вокруг Солнца со средним радиусом земной орбиты R , выразить ее в квадратных сантиметрах и умножить на солнечную постоянную:

$$4\pi R^2 \cdot 1,96 \frac{\text{м. кал}}{\text{мин}}.$$

С другой стороны, зная радиус Солнца r и определив его поверхность, мы можем рассчитать количество энергии, испускаемое 1 см^2 солнечной поверхности в минуту:

$$E_1 = \frac{4\pi R^2 \cdot 2}{4\pi r^2} \approx 89500 \frac{\text{м. кал}}{\text{мин}} = 6,25 \cdot 10^{10} \frac{\text{эрг}}{\text{сек}}.$$

Полная мощность излучения всего Солнца составляет $3,74 \cdot 10^{23}$ *квт.* Это почти в миллиард миллиардов раз больше мощности Днепрогэса. Из всей этой колоссальной энергии, излучаемой Солнцем, Земля получает приблизительно одну двухмиллиардную долю.

Найденное количество излучаемой 1 см^2 солнечной поверхности энергии дает возможность определить эффективную температуру Солнца по закону Стефана — Больцмана:

$$E_1 = \sigma T^4,$$

где T — абсолютная температура, $\sigma = 5,72 \cdot 10^{-5} \frac{\text{эрг} \cdot \text{сек}}{\text{см}^2 \cdot \text{град}^4}$.

Это дает для эффективной абсолютной температуры фотосферы 5750° К . Из всех определений температуры фотосферы различными методами можно принять как наиболее вероятную 6000° К .

Как уже отмечалось в § 142, при наблюдении в телескоп центр солнечного диска представляется ярче краев. Излучение центра по некоторым определениям соответствует 6300° , тогда как излучение краев примерно 5000° . В центре солнечного диска мы можем как бы заглянуть глубже, к нам идет излучение от более глубоких и более горячих слоев Солнца, чем у краев.

При таких температурах, принимая еще во внимание очень низкие давления, мы можем представить себе вещество только в газообразном состоянии. Кроме того, при столь высоких температурах не только молекулы разлагаются на атомы, но и сами атомы находятся в более или менее возбужденном состоянии, а также в значительной мере ионизированы.

Что касается глубоких недр Солнца, то их температуру мы из наблюдений получить не можем, так как излучение, доходящее до нас, ограничивается фотосферой. Теоретические соображения в предположении, что все Солнце состоит из идеального газа, и на основании расчетов распределения давления и температуры в направлении к центру Солнца приводят к температуре около 20 млн. градусов.

§ 146. Солнечные пятна. Цикличность появления и природа их. Изучение солнечных пятен началось с того времени, как человек направил на небо телескоп. Открыты они были, видимо, почти одновременно (в 1611 г.) рядом первых наблюдателей неба в телескоп: Фабрицием, заметившим также, что пятно совершает обращение вокруг Солнца; Галилей на основе своих наблюдений дал правильное объяснение, отнеся пятна к самой солнечной поверхности, и по их перемещению сделал заключение о вращении Солнца.

Солнечные пятна доступны для наблюдения астрономов-любителей и в школе при помощи небольших труб. Систематические наблюдения и зарисовки пятен многочисленными астрономами-любителями уже дали на протяжении истории наблюдений Солнца богатый статистический материал, представивший возможность делать научно построенные выводы о явлениях, происходящих на

Солнце. В настоящее время при специальном изучении явлений на Солнце используются все те методы, которыми располагает современная астрофизика.

Солнечные пятна — это образования в фотосфере Солнца. При всем разнообразии пятен по форме и величине можно заметить типичный вид развившегося пятна: форма округлая, центральная часть более темная — *тень* и окружающая ее более светлая, состоящая как бы из радиальных струек, — *полутень* (рис. 167). Иногда через тень перекидываются как бы светлые мостики. Надо заметить,

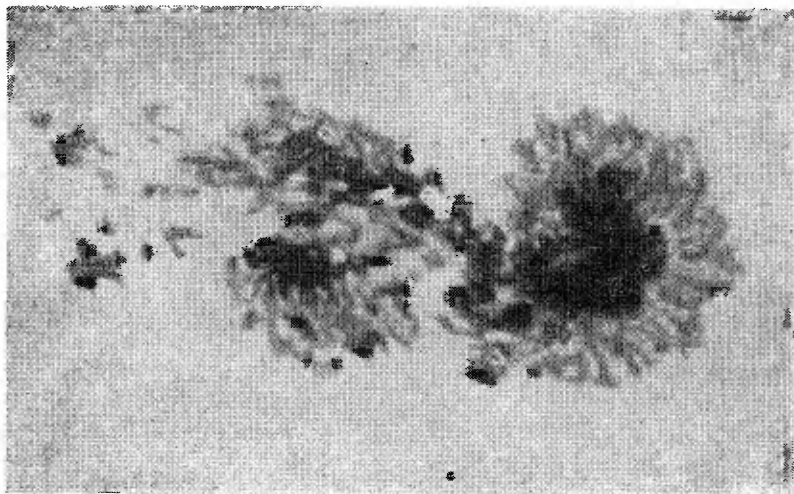


Рис. 167. Фотография группы солнечных пятен

что пятно кажется темным только по контрасту с окружающей яркой фотосферой. Точные фотометрические измерения показывают, что пятно в действительности во много раз ярче полной Луны. Когда наблюдалось прохождение Венеры или Меркурия по диску Солнца, то планета казалась заметно темнее солнечных пятен.

Размеры пятен различны, но в общем очень велики: диаметр тени составляет от 1000 до 100 000 км, а с полутенью значительно больше. Это значит, что размеры больших пятен в несколько раз превосходят диаметр нашей Земли.

Пятна часто бывают видны парами и целыми группами, иногда группа имеет одну общую полутень. Чаще же группа разбросанных возникающих пятен переходит во вторую стадию, растягиваясь на восток и на запад и превращаясь в пару пятен (рис. 167). Новейшие исследования показали, что пары пятен встречаются почти вдвое чаще, чем одиночные пятна. Иногда большое пятно делится на несколько мелких. Продолжительность жизни пятна определяется от нескольких часов до нескольких месяцев.

Учитывая движение пятен по диску Солнца от одного края к другому, противоположному вследствие его вращения, можно у отдельных пятен подметить еще их собственные движения по поверхности Солнца. Но эти движения сравнительно невелики.

Пятна наблюдаются не по всему диску Солнца, а только главным образом в зонах от 5° до 40° по обе стороны экватора. Пятна редко появляются вблизи самого экватора и совсем не встречаются дальше 45-й солнечной параллели.

Самое замечательное в явлении пятен на Солнце — это периодически изменяющееся их количество и связанный с этим целый ряд других явлений. Наблюдая систематически из года в год за пятнами, можно заметить, что в одни годы они почти каждый день видны на Солнце и по несколько одновременно, в другие — редкий день увидишь пятно. Проводя такие наблюдения почти на протяжении 20 лет, любитель астрономии Швабе установил в 1843 г., что годы максимумов и минимумов количества пятен на Солнце чередуются с периодом несколько более 10 лет. Дальнейшие наблюдения показали, что период этот не является постоянным, а в отдельных случаях претерпевает колебания примерно до 4 лет в ту или другую сторону. Напряжение пятнообразовательной деятельности Солнца характеризуется так называемым «относительным числом Вольфа». Относительное число пятен W вычисляется по формуле:

$$W = k(10g + f),$$

где k — множитель, зависящий от условий наблюдения и от инструмента, g — число наблюденных групп и отдельных пятен, f — общее число всех пятен в группах и отдельных пятен. Вольф для своих наблюдений принимал $k = 1$, наблюдал он в телескоп с объективом диаметром в 70 мм, с увеличением в 64 раза.

Изменения относительных чисел Вольфа почти за 200 лет представлены на графике (рис. 168), из которого видна не только общая количественная цикличность, но различная активность в разные максимумы, а также, как правило, более быстрое возрастание относительного числа в каждом цикле, нежели его убывание. Средний промежуток возрастаний числа пятен около 5 лет, а средний промежуток убывания — около 6 лет, что в сумме и дает *одиннадцатилетний цикл*.

Соответственно изменяется и место появления пятен: после минимума первые небольшие пятна начинают появляться на более высоких солнечных широтах $20-30^\circ$. По мере усиления солнечной деятельности пятна возникают на более низких широтах, а в максимуме — на широтах, близких к 16° . После максимума они появляются еще ближе к экватору, и последние пятна данного цикла исчезают на широте $5-10^\circ$. Иногда не успевают еще исчезнуть пятна одного цикла у экватора, как в высоких широтах возникают пятна нового цикла.

О природе солнечных пятен мы узнаем главным образом из изучения спектра их. Рисунок 169 показывает спектр пятна в виде узкой полоски на фоне спектра фотосферы.

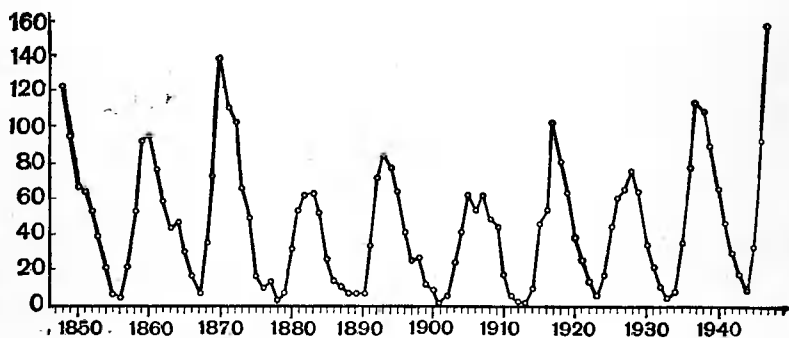
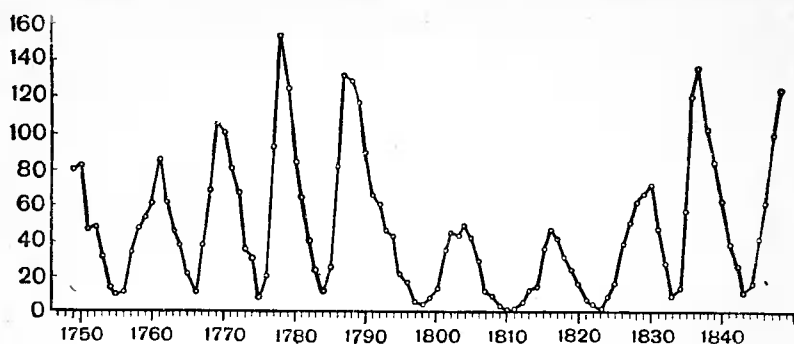


Рис. 168. Кривая цикличности солнечных пятен

При общем сходстве спектра пятна со спектром фотосферы мы замечаем усиление и ослабление большого числа линий. Усиливаются обычно линии «дуговые», а ослабляются «искровые». Кроме того, в спектрах пятен обнаруживается присутствие и таких линий и даже широких полос, которых нет в солнечном спектре.

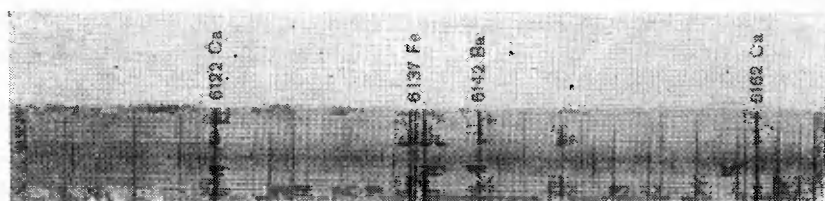


Рис. 169. Спектр солнечного пятна

Эти линии оказываются принадлежащими химическим соединениям, как окись титана и др. Это указывает на более низкую сравнительно с фотосферой температуру пятен.

Первое спектрофотометрическое исследование пятен было сделано акад. А. А. Белопольским в Пулкове в 1915 г. Пользуясь формулой Планка, Белопольский получил для температуры тени значение 3500°K . Дальнейшие более точные измерения дали для температуры тени пятна значение 4800°K . Теоретические расчеты на основании теории ионизации дают близкую величину, около 4700°K . Таким образом, понижение температуры в пятне сравнительно с фотосферой можно считать порядка 1500° .

Замечена еще одна особенность спектра пятен: в нем всегда имеет место удвоение и утроение линий. Это свидетельствует о наличии в пятнах мощных магнитных полей. Исследование снимков при разных положениях пятна у края и середины диска Солнца показало, что у середины диска линии двойные и свет поляризован по кругу, у края — линии тройные и свет плоско поляризован. Это значит, согласно эффекту Зеемана, что в первом случае направление луча света совпадает с направлением магнитного поля, а во втором случае они взаимно перпендикулярны. Принимая во внимание шарообразность Солнца, мы должны сделать вывод, что в обоих случаях магнитное поле пятна направлено перпендикулярно к солнечной поверхности.

По расстоянию между компонентами расщепленной линии можно определить напряжение магнитного поля в пятне. Оказалось, что напряжения в больших пятнах достигают 2000—4000 гауссов, т. е. в тысячи раз сильнее магнитного поля Земли.

Исследование расщепленных линий спектра пятна дает возможность определить полярность пятна, т. е. знак его магнитного полюса. Оказывается, что одни пятна обращены к нам северным магнитным полюсом, а другие — южным. Но чаще встречаются группы так называемых биполярных пятен, состоящих из двух пятен противоположной полярности: если идущее впереди пятно имеет северную полярность, то последующее — южную, и наоборот. Исследование биполярных пятен за последние десятилетия привело к открытию магнитной цикличности их. Замечено было, что до минимума 1913 г. полярность всех передних или ведущих пятен в парах в северном полушарии Солнца была южная, последующих пятен — северная. В то же время в южном полушарии Солнца наблюдалось обратное явление. После минимума, когда появились пятна нового цикла, в них обнаружили все указанные магнитные явления в обратном порядке: ведущие пятна в северном полушарии имели северную полярность, а в южном полушарии — южную, и так продолжалось в течение всего цикла с 1913 г. до 1924 г. В 1924 г. с появлением пятен нового цикла в них ведущие пятна северного полушария оказались вновь с южной полярностью, а южного полушария — с северной полярностью, т. е. произошло повторение того, что наблюдалось в период 1913 г. Минимум 1934 г. вновь подтвер-

дил обращение полярностей. Таким образом, цикл магнитной деятельности Солнца оказывается равным двум циклам пятнообразующей деятельности с периодом около 22 лет. Все это наглядно поясняется рисунком 170, где кружки изображают пятна с обозначением их полярности, а кривые — зоны образования пятен каждого отдельного цикла.

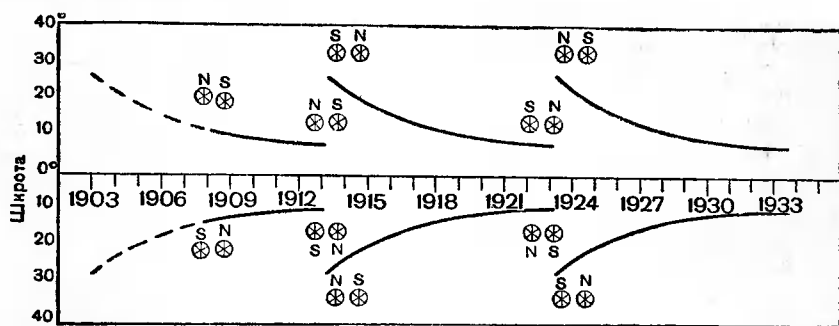


Рис. 170. Изменение магнитной полярности солнечных пятен

Для исследования явлений в солнечных пятнах представляют большой интерес фотографии областей пятен, полученные в определенных лучах на различных уровнях при помощи спектрогелиографа.

На рисунке 171 изображена водородная спектрогелиограмма в области большой биполярной группы пятен, дающая картину явления, происходящего в хромосфере над пятнами. Расположение флоккул обнаруживает их спиральную структуру, причем над пятнами, образующими пары, наблюдаются противоположные вращения, с чем, по-видимому, связаны магнитные поля пятен, о которых говорилось выше. На photographиях около пятен видно нечто вроде вихрей, центры которых совпадают с ядрами обоих солнечных пятен.

При помощи спектрогелиоскопа наблюдались радиальные движения газовых масс над пятнами, причем темные водородные флоккулы — волокна — как бы вытягивались в пятно. С другой стороны, обнаружено смещение линий в спектре пятен в сравнении со спектром окружающей фотосферы, но при определенном их положении на диске Солнца.

Когда пятно находилось близко к середине диска, никакого смещения не обнаруживалось. Но смещения становились заметными по мере удаления пятен к краям диска. В обращенной к середине диска части пятна эти смещения происходили в направлении к фиолетовому концу спектра, а в обращенной к краю диска — к красному (явление Эвершеда). При этом, когда пятно переходило на другую сторону солнечного диска, то смещения для тех же частей пятна были обратны прежним. Отсюда было сделано определенное

закключение о том, что из пятен в фотосферу происходит истечение газа в радиальных к пятну направлениях, что и наблюдается в полутени пятна. Более точное сопоставление наблюдений одного и того же пятна в восточной и западной частях диска Солнца приводит к тому выводу, что истечение газов происходит не горизонтально, а наклонно вниз, под некоторым углом к поверхности Солнца.

Все это указывает на то, что в области солнечной атмосферы над пятнами имеет место следующая циркуляция газов: в нижнем слое

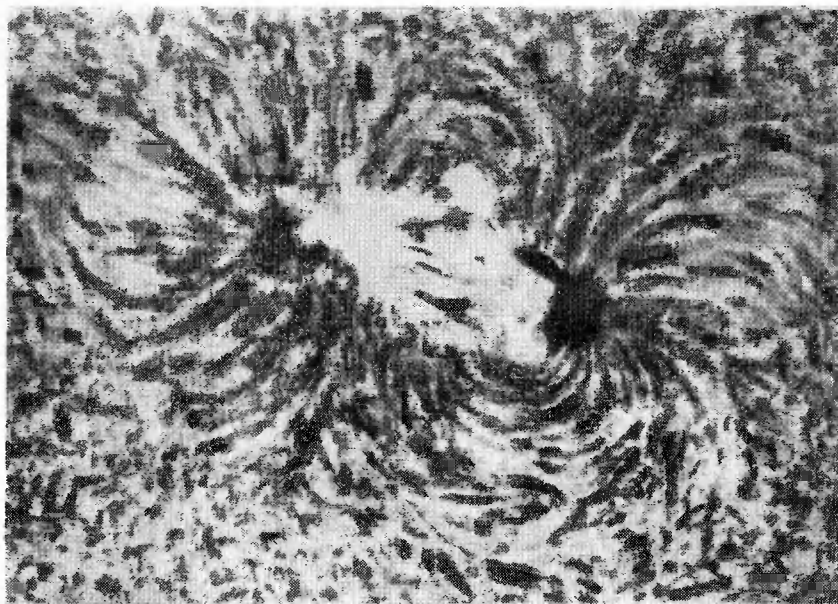


Рис. 171. Спектрогелнограмма области группы солнечных пятен

газ вытекает радиально из пятна, в верхних же слоях происходит втекание газов внутрь области пятна (рис. 172). Скорость этих движений определяется несколькими километрами в секунду.

На основании последних более подробных исследований процесс образования самого пятна представляют так, что восходящие токи газов из недр Солнца не выходят за пределы фотосферы, а лишь, подойдя к ней, растекаются во все стороны. Восходящий ток образует в пятне пониженную температуру. При этом в нижних слоях хромосферы над этой областью наблюдается движение газов от ядра к периферии, а в верхних — от периферии к ядру. Причина образования пятен остается пока еще не выясненной до конца.

§ 147. Факелы — более яркие образования, чем общий фон солнечной поверхности, в виде хлопьев или жилок. Они обыкновенно

видны на Солнце в телескоп ближе к краям солнечного диска, где сама поверхность Солнца менее ярка (рис. 173). Это не значит, что в середине диска факелов нет.

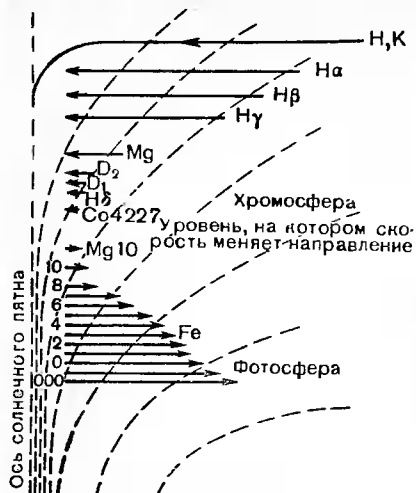


Рис. 172. Вертикальный разрез солнечного пятна

Особенно много факелов бывает видно около пятен. Общее поле группы пятен и факелов иногда называют *активной областью* на Солнце. Количество факелов на Солнце подвержено той же цикличности, что и количество пятен. Но факелы наблюдаются и в более высоких широтах, чем пятна, а в отдельных случаях и у полюсов. Средняя площадь факелов превосходит площадь пятен в два с лишним раза. По сравнению с пятнами факелы обладают большей продолжительностью существования.

Спектры факелов в общем мало отличаются от нормального спектра Солнца. Отмечается, что линии дуговые, или малого воз-

буждения, ослаблены в спектре факела, а искровые, или сильного возбуждения, усилены, причем линии ионизированного кальция часто оказываются обращенными, т. е. яркими. Определение температуры факелов, произведенное в Пулковке в 1931 г. на основании закона Планка, привело к выводу, что температура факелов градусов на 150 выше, чем температура фотосферы. Факелы образуются, видимо, в верхних слоях фотосферы.

Спектрогелиограммы (в особенности в лучах кальция) показывают, что очертания флоккулов на самых нижних уровнях близко согласуются с очертаниями факелов (рис. 174). Флоккулы, видимо, являются областями солнечной атмосферы, которые светятся под влиянием действия находящихся внизу возмущенных частей фотосферы, каковыми и являются факелы. Поэтому очертания и распределение интенсивности флоккулов примерно таковы же, как и факелов.

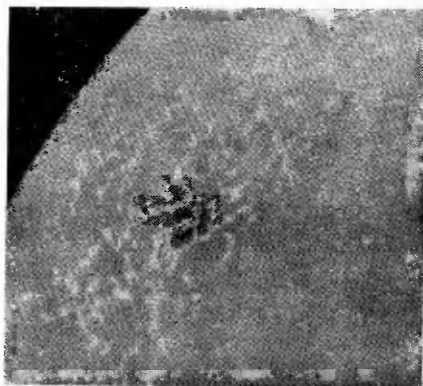


Рис. 173. Факелы вокруг группы солнечных пятен у края солнечного диска

§ 148. Хромосфера, т. е. окрашенная сфера, названа так потому, что она бывает видна во время полного солнечного затмения как тонкое розовое или красноватое кольцо, окружающее Солнце. Она и представляет собой ту часть солнечной атмосферы, которая поднимается над фотосферой. Тонкий слой, лежащий над фотосферой, носит название *обращающего слоя*. Обращающий слой очень хорошо наблюдается при помощи объективной призмы в те несколько секунд полного солнечного затмения, когда Луна только что закрывает край фотосферы. В этот момент обычный солнечный спектр с темными линиями исчезает, а вспыхивают многочисленные светлые линии газового спектра там, где в солнечном спектре были темные линии, почему слой и назван *обращающим*. Полученный таким образом спектр излучения называют *спектром вспышки*. Если снимок сделан при помощи объективной призмы, то на нем спектральные линии имеют вид серпов, воспроизводящих форму светящегося слоя у прикрытого Луной края фотосферы, причем длина этих серпов служит явным указанием на высоту, до которой простираются атомы отдельных элементов в хромосферу: чем длиннее серп, тем на большей высоте находится соответствующий элемент (рис. 175, вверху).

Есть и другой способ получения спектра вспышки, основанный на применении щелевого спектрографа с движущейся фотографической пластинкой. В этом случае перед пластинкой, на которой получается спектр покрывающегося Луной серпа Солнца, помещается ширма со щелью вдоль всего спектра. Щель вырезает центральную часть спектра. Фотографическая пластинка непрерывно и равномерно подвигается перпендикулярно к щели и фиксирует последовательно различные части, начиная от края фотосферы, по мере того как Луна закрывает слои, лежащие над фотосферой, все выше

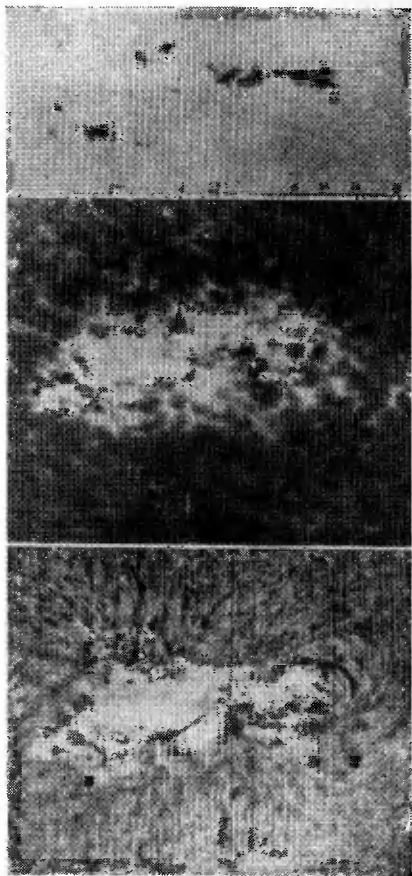


Рис. 174. Фотография группы пятен (вверху) и спектрогелиограммы области над ней: в лучах кальция (в середине) и в лучах водорода (внизу)

и выше. Сначала получается спектр остающегося еще серпа Солнца с темными линиями, затем он переходит в спектр множества светлых линий обращающего слоя, а затем в отдельные светлые линии все более и более высоких слоев хромосферы (рис. 175, внизу).

Спектр хромосферы в настоящее время наблюдают и вне затмения, ставя щель у самого края Солнца. При помощи спектрогелиографа, как мы видели, можно фотографировать и исследовать отдельные элементы, входящие в хромосферу и проектирующиеся на самый солнечный диск, т. е. получать спектрогелиограммы в линиях

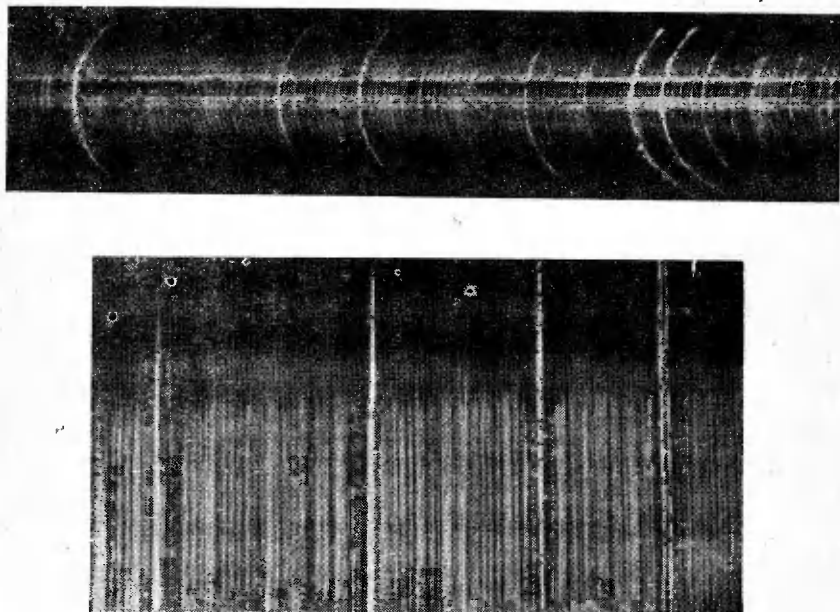


Рис. 175. Спектры вспышки, снятые объективной призмой (вверху) и щелевым спектрографом (внизу)

того или другого элемента и на различных уровнях. Это дает возможность видеть хромосферу, выделяя свет, заключенный внутри одной лишь спектральной линии и освобождаясь от остального света.

Изучение спектра вспышки приводит к следующим выводам. Обращающий слой постепенно переходит в хромосферу. Высота обращающего слоя не превосходит 500 км, тогда как общая высота хромосферы около 15 000 км. За немногими исключениями все светлые линии спектра вспышки соответствуют темным фраунгоферовым линиям нормального солнечного спектра. Но в интенсивности тех и других линий нет полного соответствия, особенно в от-

ношении гелия, линии которого в нормальном солнечном спектре обычно не наблюдаются за исключением активных областей Солнца. Наиболее яркими в спектре вспышки являются линии ионизированного кальция (H и K), водорода (35 линий серии Бальмера) и гелия, затем железа, титана и др.

Большинство линий образуется в пределах указанной высоты обращающего слоя. Это значит, что поглощение лучей, идущих от фотосферы к нам, происходит главным образом в обращающем слое, содержащем все те элементы, которые характеризуются фраунгоферовыми линиями. Фотометрические исследования линий в спектре вспышки дали возможность подойти к определению температуры и давления в обращающем слое: температура оказывается около 5000° и давление порядка 10^{-4} ат. Особенно большой высоты в хромосфере достигают атомы ионизированных кальция (14 000 км) и водорода (12 000 км). На значительной высоте обнаруживается гелий (7500 км). Нейтральный же кальций находится на высоте 5000 км.

То, что ионизированные атомы находятся на более высоких уровнях, чем нейтральные, по-видимому, объясняется уменьшением давления с высотой: при пониженном давлении атомы дольше находятся в ионизированном состоянии. В отношении гелия, не обнаруживающего себя во фраунгоферовых линиях солнечного спектра, полагают, что это объясняется высоким потенциалом возбуждения гелия. Обращает на себя внимание особенно тот факт, что такой тяжелый элемент, как кальций (атомный вес 40), простирается в хромосфере выше, чем водород и гелий. Это может быть только в том случае, если кальциевая хромосфера поддерживается какой-то силой, направленной снизу вверх, т. е. против силы тяжести. Теоретические исследования как будто приводили к выводу, что этой силой должно быть световое давление со стороны фотосферы, и именно селективное, которое по отношению атомов кальция дает иной эффект, чем по отношению атомов других элементов, в связи с количеством энергии, потребным на возбуждение атомов и их ионизацию. Но это еще нельзя считать полностью выясненным.

В связи с этим и с очень высокой температурой надо отметить и то обстоятельство, что падение плотности с высотой в хромосфере идет в несколько раз медленнее, чем уменьшение напряжения силы тяжести. Иначе говоря, солнечная атмосфера поднимается выше, чем это должно быть в газовой атмосфере, под действием огромной силы тяжести на поверхности Солнца. Медленное уменьшение плотности солнечной атмосферы приписывается также вихревым движениям.

В хромосфере были замечены особые яркие *вспышки* в виде быстро разгорающихся облаков, иногда по своей яркости превосходящие яркость фотосферы. Вспышки представляют собой образования, возникающие на различных уровнях, и подобны взрывам. Обычно через несколько минут их блеск ослабевает и совсем гаснет. Появление таких больших вспышек, или эрупций, сопровождается мощным

ультрафиолетовым излучением, оказывающим большое влияние на земную атмосферу. По месту и времени возникновения они тесно связаны с пятнами. Чаще всего вспышки появляются во время развития или распада пятен. Температура их около 10 тыс. градусов (рис. 176).

Хромосфера представляется скоплением большого числа отдельных тонких выступов, называемых хромосферными *спикулами*. Число их настолько велико, что они образуют как бы сплошное пламя вокруг фотосферы. Обращающий слой, видимо, представляет собой



Рис. 176. Хромосферная вспышка 8 августа 1937 г. Правый снимок сделан через 11 минут после левого, изображающий вспышку в момент наибольшей интенсивности

наиболее плотный самый нижний слой, где газы распределены уже главным образом под действием силы тяжести. Ряд физических соображений указывает на то, что температура хромосферы несколько выше температуры обращаемого слоя.

Самый вид хромосферы, которая представляется как бы постоянно колеблющейся, показывает, что нельзя считать ее находящейся в спокойном равновесном состоянии. Это же подтверждается и спектрогелиограммами с завихряющимися, в особенности около пятен, флоккулами и волокнами. Замечено, что во время наиболее интенсивной солнечной деятельности, в годы максимума пятен, хромосфера имеет почти одинаковую высоту вдоль всего края Солнца, тогда как во время минимума она уменьшается, в особенности близ экватора. Наконец, из хромосферы в разных местах выбрасываются как бы струи или языки пламени, так называемые *протуберанцы*.

§ 149. Протуберанцы, или выступы над хромосферой, прежде наблюдали во время полных солнечных затмений, и возникал вопрос, принадлежат ли они Солнцу или Луне. Астрономы Пулков-

ской обсерватории на основании наблюдений во время затмений показали, что протуберанцы не могут принадлежать Луне, а представляют образования на Солнце. Затем нашли способы видеть их и вне затмений, так же как и хромосферу, направляя щель спектроскопа на край солнечного диска. В этом случае получаются два наложенных друг на друга спектра: спектр освещенного неба близ края Солнца (солнечный спектр) и накладывающийся на него спектр протуберанца. Последний состоит из отдельных ярких линий, причем яркость этих линий не зависит от дисперсии, тогда как спектр солнечного света делается слабым при большой дисперсии. Расширяя щель или перемещая ее, можно рассмотреть очертания протуберанца (рис. 178). Таким образом наблюдаются протуберанцы у краев солнечного диска. Но на спектрогелиограммах можно видеть протуберанцы, проектирующиеся на диск Солнца в виде темных волокон. В последнее время применяется особый способ наблюдения протуберанцев при помощи специального фильтра, который пропускает только свет, соответствующий длине волны яркой водородной линии. Особенно большие успехи в изучении движения и развития протуберанцев были достигнуты с применением киносъемки.

Такие исследования с новыми оригинальными солнечными установками производятся в СССР. Они уже дали важные результаты, в особенности на Крымской астрофизической обсерватории.



Рис. 177. Спектрогелиограмма края солнечного диска с протуберанцами

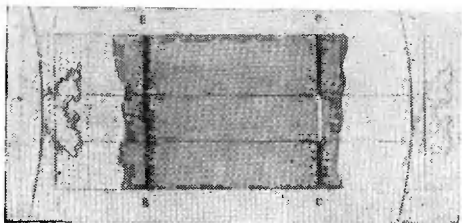
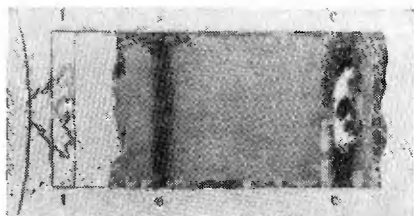


Рис. 178. Схемы, объясняющие наблюдение протуберанцев вне затмения

Протуберанцы в общем следуют 11-летней цикличности деятельности Солнца, но она не так резко выражена в протуберанцах, как в пятнах. Максимумы для протуберанцев наступают в большинстве случаев раньше, чем для пятен. Зоны наибольшего образования пятен и протуберанцев также не вполне совпадают.

Прежде считали, что все протуберанцы — это выбросы из Солнца, и делили их на спокойные и эруптивные. Обширные исследования с применением кинематографии показали, что движение сверху вниз

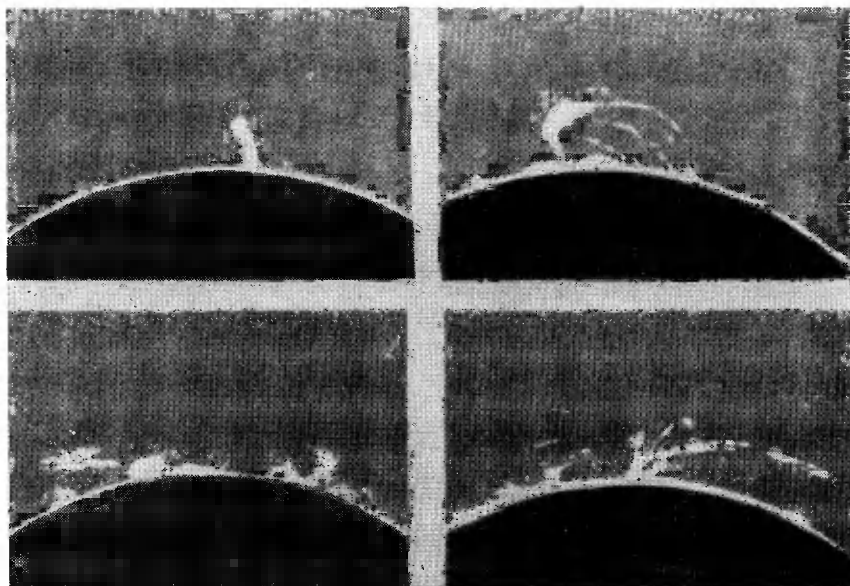


Рис. 179. Различные типы протуберанцев

к поверхности Солнца и в других направлениях наблюдаются так же часто, как и движение от поверхности Солнца. Иногда протуберанцы образуются в области солнечной короны и оттуда движутся вниз в область пятен. Во многих случаях наблюдается движение от одного протуберанца к другому преимущественно параллельно поверхности Солнца. А. Б. Северный на основе большого материала, полученного на Крымской астрофизической обсерватории, выделяет три главных типа движений у протуберанцев (рис. 179).

Протуберанцы одного типа в течение многих часов, а иногда и суток имеют вид спокойного облака или арки. Развитие начинается с внезапных быстрых движений в основании протуберанца, происходит в очень быстром темпе, определяемом минутами, словно он испытал толчок. В некоторых эруптивных протуберанцах этого типа скорости достигают таких значений, при которых масса может

навсегда покинуть Солнце. Они сравнительно редки, составляя не более 10% (рис. 180).

Движения второго типа наблюдаются преимущественно у протуберанцев, возникающих по соседству с группой пятен, у активных областей Солнца. Для них характерны движения узлов и струй вдоль определенных линий, сходных с силовыми линиями магнитного поля. Иногда эти движения образуют петлю, начинаясь и кончаясь у поверхности Солнца. Бывают и такие, которые возникают в корональном пространстве и разгораются по мере движения к поверхности Солнца. Скорости движения в этих протуберанцах меньше, чем в эруптивных. Анализ их приводит к электромагнитной их природе. Видимо, магнитные поля здесь связаны с пятнами (рис. 181).

Довольно многочисленны протуберанцы третьего типа, в которых движения носят неупорядоченный, хаотический характер. Обычно они большого размера и со сравнительно малыми скоростями. В проекции на солнечный диск эти протуберанцы видны как длинные волокна. Природа неупорядоченных движений в них имеет общее с природой изменений в земных облаках. По-видимому, эти протуберанцы принимают участие в общих хаотических движениях солнечной атмосферы в целом.

Представляет большой интерес вопрос о том, какими силами вещество протуберанцев поднимается на большие высоты. Несомненно, здесь играет роль световое давление, которое временами и в отдельных местах на Солнце может усиливаться, как например в хромосферных вспышках. Но световое давление действует селективно, т. е. по-разному, на различные атомы, в протуберанцах же все вещество, независимо от состава, движется как одно целое, не разделяясь на отдельные газы. Во всяком случае, одного светового давления, видимо, недостаточно для полного объяснения яв-

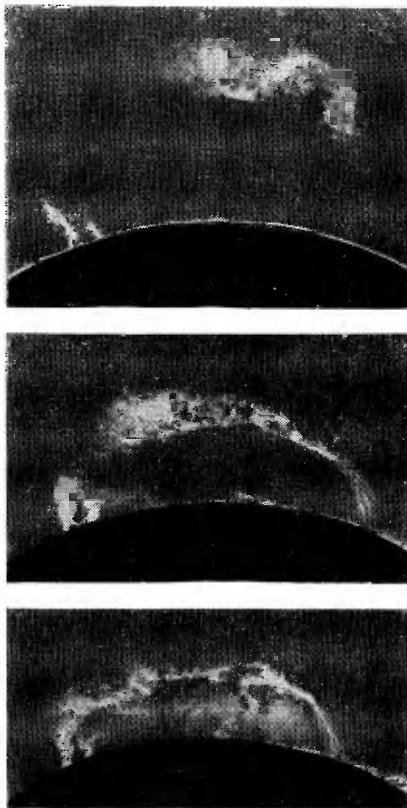


Рис. 180. Изменение протуберанца, наблюдавшегося 23 мая 1919 г. в 1 ч. 41 м. (внизу), в 2 ч. 57 м. (в середине) и в 5 ч. 33 м. (вверху)

ления протуберанцев. За последнее время выяснено, что в атмосфере Солнца играют важную роль электромагнитные силы, которые могут иметь отношение к протуберанцам.

В отношении химического состава вещества протуберанцев спектральные исследования показали, что он в общем таков же, как и состав хромосферы и фотосферы.

§ 150. **Солнечная корона.** То обширное, светлое, нежное сияние вокруг Солнца, которое наблюдается во время полных солнечных

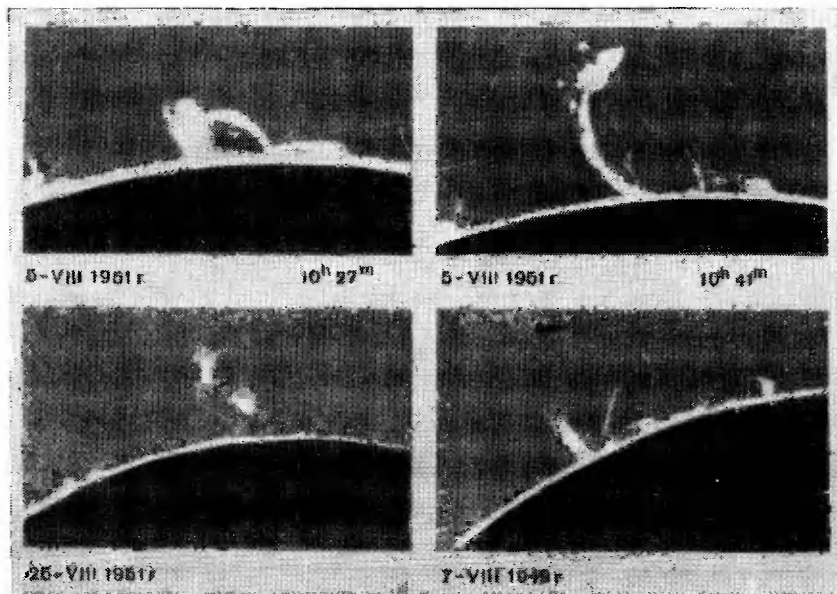


Рис. 181. «Электромагнитные» протуберанцы

затмений, названо *солнечной короной* (рис. 182). Общий блеск ее составляет примерно 0,5 блеска полной Луны. Корона начинается там, где заканчивается хромосфера. Простираясь дальше на расстояние, значительно превышающее солнечный радиус, корона постепенно все слабеет и, наконец, сливается с фоном неба. В отдельных случаях удавалось проследить корону до расстояния в 4—5 солнечных радиусов (свыше 2°). Различают *внутреннюю* и *внешнюю* корону. Внутренняя — это нижняя и наиболее яркая часть короны, простирающаяся приблизительно до $5'$ от края солнечного диска (на 200 000 км) (рис. 183). Цвет ее очень близок к солнечному. Вся остальная часть, где свет, переходя из желтоватого в белый, быстро убывает по мере удаления от Солнца, составляет *внешнюю* корону, в которой можно заметить светлые струи и лучи, часто изогнутые.

Протуберанцы, поднимающиеся на десятки и сотни тысяч километров, находятся в области внутренней короны, а иногда заходят и во внешнюю.

Самая форма короны бывает различна в разные годы и, как это установил русский астроном А. П. Ганский, меняется в соответствии с количеством пятен и протуберанцев: при максимуме пятен корона со всех сторон окружает Солнце приблизительно в одинаковой степени; при минимуме корона вытянута главным образом по солнечному экватору, а у полюсов состоит только из коротких лучей

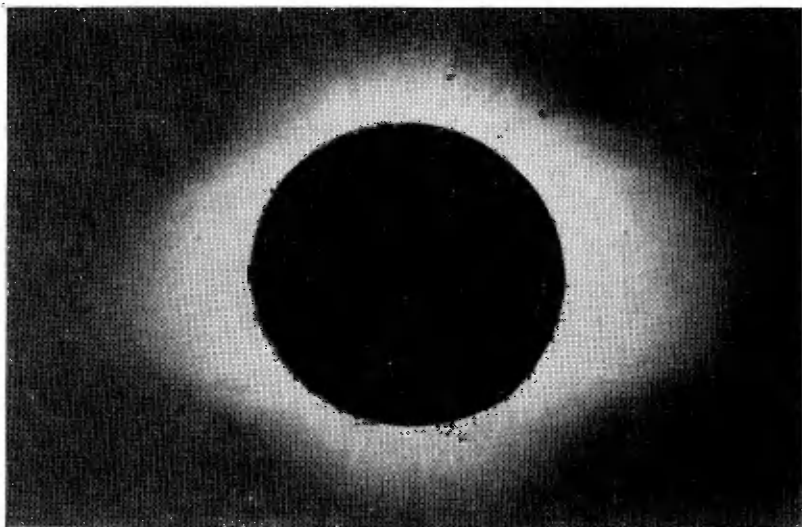


Рис. 182. Фотография солнечной короны 30 июня 1954 г.

(полярные щеточки); между максимумом и минимумом корона имеет некоторую промежуточную форму. Такое изменение формы короны указывает на то, что причина образования короны находится не столько в пятнах, которые концентрируются ближе к экватору, сколько в общей деятельности поверхности Солнца, в частности в протуберанцах.

При приближении к максимуму, когда наиболее активные зоны протуберанцев лежат в средних и более высоких широтах и встречаются почти по всей поверхности Солнца, корона имеет форму, как бы «растрепанную» во все стороны. В эпоху же минимума в соответствии с перемещением активных зон на низкие широты корона вытягивается главным образом по солнечному экватору, а у полюсов остаются только короткие щетки (рис. 183).

Таким образом, корона не является стационарным образованием, и все ее изменения тесно связаны с процессами, происходя-

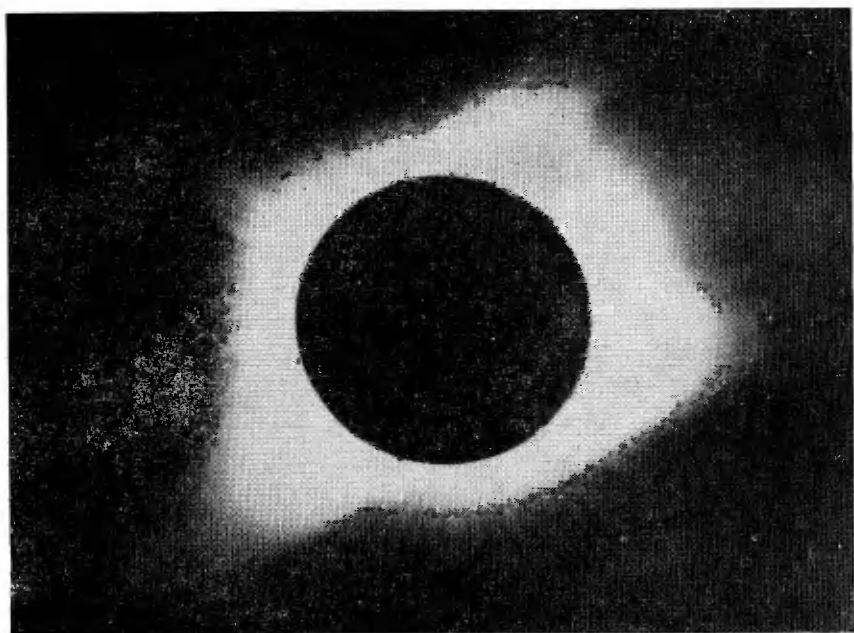
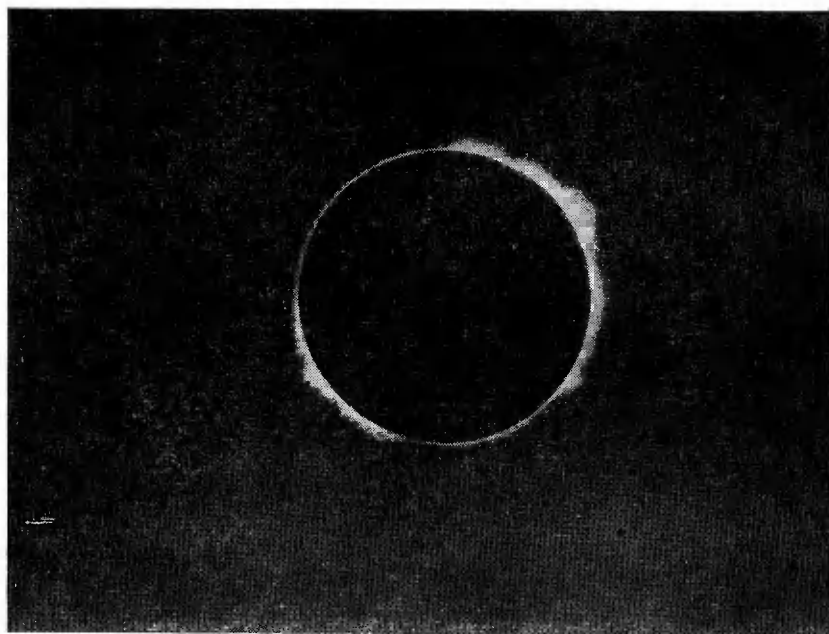


Рис. 183. Фотографии солнечной короны 25 февраля 1952 г., снятые Е. Я. Бугославской: внутренняя корона (*вверху*), внешняя корона (*внизу*)

щими в фотосфере и хромосфере, в особенности с протуберанцами. Изучение природы короны имеет очень большое значение для понимания солнечной деятельности и связей с ней земных явлений. Главная трудность этого изучения заключается в том, что в основном корона наблюдалась только во время полных солнечных затмений, длящихся обычно 2—3 минуты. Около 25 лет назад французский астроном Лيو сделал попытку наблюдать корону вне затмений. Он построил специальный инструмент, в котором тщательным образом устранялся рассеянный свет Солнца. Наблюдения велись на горе Пик дю Миди в Пиренеях, высотой в 3000 м. Принцип устройства этого внезатменного коронографа состоит в следующем

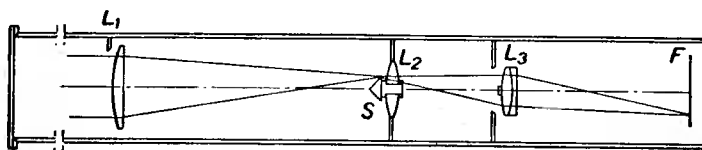


Рис. 184. Схема внезатменного коронографа

(рис. 184). Объектив, состоящий из одной линзы L_1 , дает изображение Солнца и короны; круглый экран S в фокусе линзы закрывает изображение солнечного диска; следующая линза L_2 дает изображение незакрытой экраном короны на фотопластинке. Помещаемые, кроме того, в трубе диафрагмы и дополнительные линзы служат для устранения остающегося рассеянного света, который исходит главным образом от краев объектива. В СССР внезатменные коронографы имеются на горной станции Пулковской астрофизической обсерватории близ Кисловодска, на высоте 2000 м, в Крымской астрофизической обсерватории, в Институте астрофизики Академии наук Казахской ССР. Эти наблюдения дают весьма ценные дополнения к наблюдениям короны во время полных солнечных затмений, главным образом в отношении внутренней короны.

Большие и очень важные работы проведены советскими учеными по наблюдениям и исследованиям короны. Академик В. Г. Фесенков на основании фотографических наблюдений, произведенных С. Н. Блажко в затмение 1914 г., получил важные выводы в отношении поляризации короны, а затем провел и ряд других работ по изучению внешней короны и по учету влияния рассеяния света. В особенности же ценные результаты дала обработка материалов, полученных в затмения 1936 и 1941 гг., которая была проведена советскими астрономами. На основании этих и ряда других исследований многие явления в короне стали гораздо яснее.

Изучение спектрального состава короны показывает, что спектры внутренней и внешней короны весьма различны. Спектр внутренней короны — непрерывный, с таким же в общем распределением энергии, как и спектр Солнца. На нем не видно темных линий по-

глощения, но есть яркие эмиссионные линии, накладывающиеся на непрерывный спектр от ультрафиолетовой его части до инфракрасной. Из них особенно выделяется зеленая линия $\lambda 5303 \text{ \AA}$. Эти корональные линии представляют особый интерес. Их долго не удавалось отождествить ни с какими известными элементами. Поэтому некоторые предположили наличие в короне особого, легкого элемента, которому дали название корония. Но теперь можно считать окончательно выясненным, что это предположение неверно, а корональные линии обязаны своим происхождением высокоионизированным (от 9- до 15-кратной ионизации) железу, никелю, кальцию

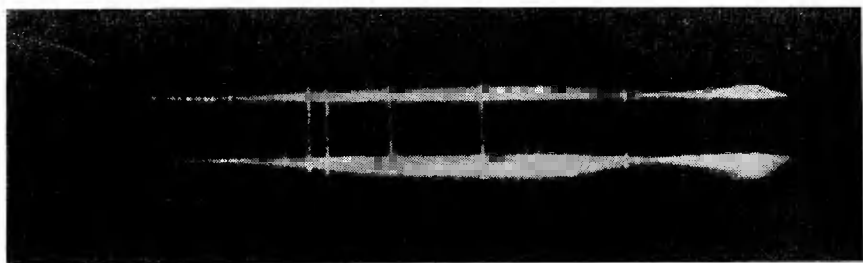


Рис. 185. Спектр солнечной короны

и аргону. Свечение внутренней короны, по-видимому, является результатом рассеяния радиации фотосферы быстро движущимися свободными электронами. Надо принять во внимание крайнюю разреженность материи в короне.

В спектре внешней короны яркие линии пропадают, появляются линии поглощения, все более заметные, которые совпадают с линиями обычного солнечного спектра, но выражены слабее. Свечение материи во внешней короне, видимо, определяется двумя различными источниками. Одна часть света внешней короны излучается материей, связанной непосредственно с Солнцем и являющейся продолжением внутренней короны. Вторым источником света внешней короны являются частицы пыли, наполняющие межпланетное пространство. Из таких же частиц состоит и зодиакальный свет.

Скорость движения электронов во внутренней короне так велика, что определяемая по этой скорости температура достигает миллиона градусов. Отсутствие линий поглощения в спектре внутренней короны и объясняется «замыванием», вызванным сильным доплеровским расширением линий при рассеянии света частицами, быстро движущимися в различных направлениях. Чтобы объяснить происхождение такой высокой температуры, московский астроном И. С. Шкловский построил теорию, по которой «нагревание» короны и наличие очень быстрых электронов, соответствующих

температуре в миллион градусов, происходит в результате индукционных электрических полей, возникающих под действием магнитных полей на Солнце и их изменений.

Исследования структуры короны и форм ее деталей, произведенные советскими учеными (Е. Я. Бугославской и др.), приводят к тому, что они зависят от явлений, происходящих в нижележащих слоях Солнца.

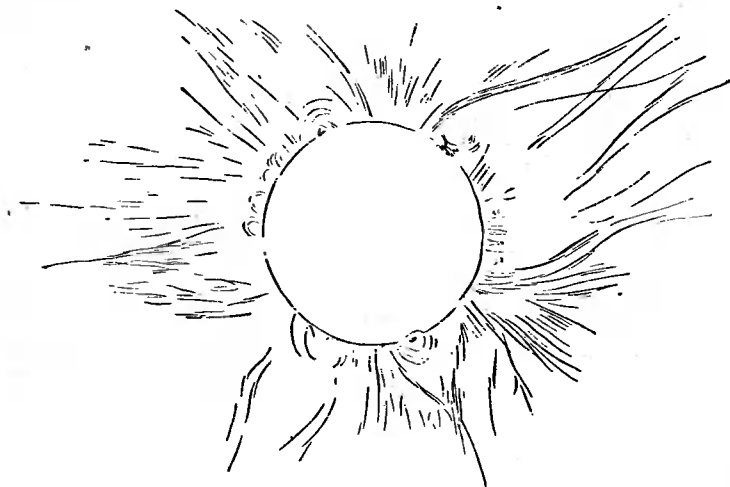


Рис. 186. Схематический рисунок солнечной короны

Протуберанцы обычно охватываются дугowymi или «шлемовидными» куполообразными оболочками. Из факелов исходят мощные корональные «лучи», вблизи пятен они деформируются. Над большими группами пятен образуются оболочки особенно больших размеров: у основания они отклоняются в стороны, а потом опять сближаются. Из хромосферы в корону непрерывно выбрасывается материя, которая затем или падает назад, или рассеивается в короне. Полярные лучи похожи на силовые линии намагниченной сферы. Изучение движений в солнечной короне показало, что смещения лучей в общем удовлетворяют предположению о вращении короны. Характер поведения различных деталей короны показывает, что на Солнце, помимо местных магнитных полей в возбужденных областях, существует общее магнитное поле.

В последние годы установлено наличие *радиоизлучения*, идущего от Солнца. Нужно сказать, что солнечная атмосфера, прозрачная для света фотосферы, уже не прозрачна для радиоволн. Хромосфера непрозрачна для сантиметрового и метрового диапазона, а корона непрозрачна для метровых волн. Поэтому сантиметровые волны могут идти к нам от хромосферы, проникая сквозь корону, а метровые — уже от самой короны.

Радиоизлучение «спокойного» Солнца на некотором определенном уровне объясняется тем, что солнечная атмосфера излучает радиоволны, как всякое сильно нагретое тело, наряду с оптическим излучением. Периоды же бурного радиоизлучения связаны с солнечными пятнами и имеют источник на некоторой высоте над пятнами. При этом наблюдаются кратковременные всплески, так называемые «пички». Эти всплески радиоизлучения наблюдаются и во время больших хромосферных вспышек.

Все это показывает, насколько плодотворным уже оказывается применение радионаблюдений и в астрономии. Если при этом учесть, что радиоизлучение не зависит от облачности и вообще от метеорологических условий, то можно сказать, что радиотехника дает новый мощный метод исследования верхних слоев солнечной атмосферы, которые имеют особое значение для ряда явлений на Земле.

§ 151. Связь геофизических явлений с циклической деятельностью Солнца. Связь всех явлений на Солнце указывает на существование какой-то общей причины, вызывающей их цикличность. Но такая общая причина в изменениях солнечной деятельности еще не вскрыта. Вероятнее всего, причина заключается в процессах, происходящих в еще недоступных для непосредственного исследования недрах Солнца: там, несомненно, протекают реакции с выделением громадных количеств атомной энергии.

Систематические измерения энергии, излучаемой Солнцем, обнаруживают очень малые колебания солнечной постоянной, связанные с циклическими изменениями солнечной деятельности, причем наибольшие значения чаще приходится на годы максимума солнечных пятен. Это указывает на то, что максимум пятен соответствует повышенной деятельности Солнца.

Естественно, возникает имеющий важное практическое значение вопрос о том, как все изменения солнечной деятельности отражаются на геофизических явлениях. При выяснении этого вопроса надо иметь в виду, что сколь грандиозными нам бы ни представлялись циклически изменяющиеся явления на Солнце, они имеют сравнительно очень небольшое значение в общем солнечном излучении. Общий мощный поток солнечной энергии отличается удивительно постоянством. За всю историю человечества, вероятно, и за всю геологическую историю Земли (миллиард лет) общая температура земной поверхности не изменилась значительно. Это значит, что и температура Солнца мало изменилась даже за миллиард лет. Энергия Солнца непрерывно поступает из его недр, а потому процессы, происходящие в наружных оболочках Солнца, наблюдаемых нами, не в состоянии значительно изменить льющийся поток солнечной энергии.

Какие же явления на Земле могут находиться в тесной связи с наблюдаемыми циклическими явлениями во внешних слоях Солнца? Эти слои дают потоки заряженных частиц — свободных электронов и ионов, несущихся от Солнца по всему пространству планетной системы, — так называемое корпускулярное излучение. Происхо-

дят колебания и в ультрафиолетовом излучении Солнца, имеющем большое значение для явлений в нашей атмосфере. Поэтому те явления на Земле, которые связаны с частицами и ультрафиолетовыми лучами, обнаруживают особенно тесную связь с циклической деятельностью Солнца. К таким явлениям на Земле относятся прежде всего земной магнетизм и явления, происходящие в верхних слоях атмосферы и проявляющиеся в полярных сияниях, а также в образовании так называемых ионосфер, ионизированных слоев в верхних слоях атмосферы Земли.

О магнитном поле Земли и его изменениях мы можем судить по магнитной стрелке, которая, оказывается, не всегда остается в одинаковом положении. Прежде всего обнаруживаются регулярно

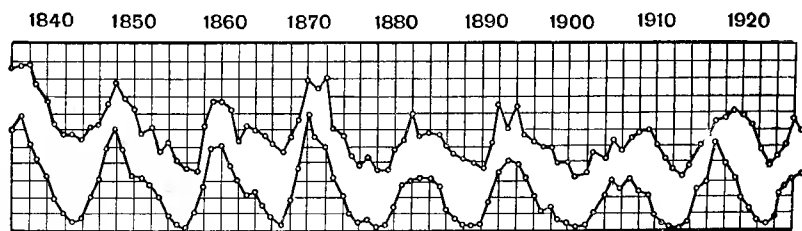


Рис. 187. Связь периодичности солнечных пятен (нижняя кривая) и земных магнитных возмущений (верхняя кривая)

повторяющиеся суточные колебания стрелки в течение дня, тогда как ночью она остается неподвижной. Амплитуда суточного колебания стрелки регулярно меняется в течение года с максимальным значением летом и минимальным зимой. В этом ясно проявляется усиливающееся влияние Солнца на магнитное поле Земли. Но, помимо этих, в общем малых колебаний стрелки, измеряющихся малыми долями градуса, наблюдаются и неправильные, быстро происходящие колебания, доходящие до нескольких градусов и имеющие характер возмущений магнитного поля Земли, или так называемых магнитных бурь.

Уже в середине XIX в. было замечено, что амплитуда суточных колебаний земного магнетизма и количества магнитных возмущений изменяются с периодом в 10—11 лет, усиливаясь в годы максимума солнечных пятен. Все позднейшие наблюдения полностью подтвердили эту зависимость, которая наглядно изображена на рисунке 187.

Особенно сильные возмущения магнитного поля Земли происходят после того, как через середину солнечного диска пройдут большие пятна или группы пятен. Многократные наблюдения показали, что момент максимума магнитного возмущения на Земле не совпадает с моментом прохождения пятна через среднюю часть диска Солнца, а отстает от него на 1—2 дня. Это указывает на то,

что магнитное возмущение вызывается не световой радиацией, а корпускулярной, т. е. потоками заряженных частиц, несущихся от наиболее активных областей Солнца. По времени запаздывания можно судить о скорости корпускул, которая составляет от нескольких сот до 3 тысяч км/сек.

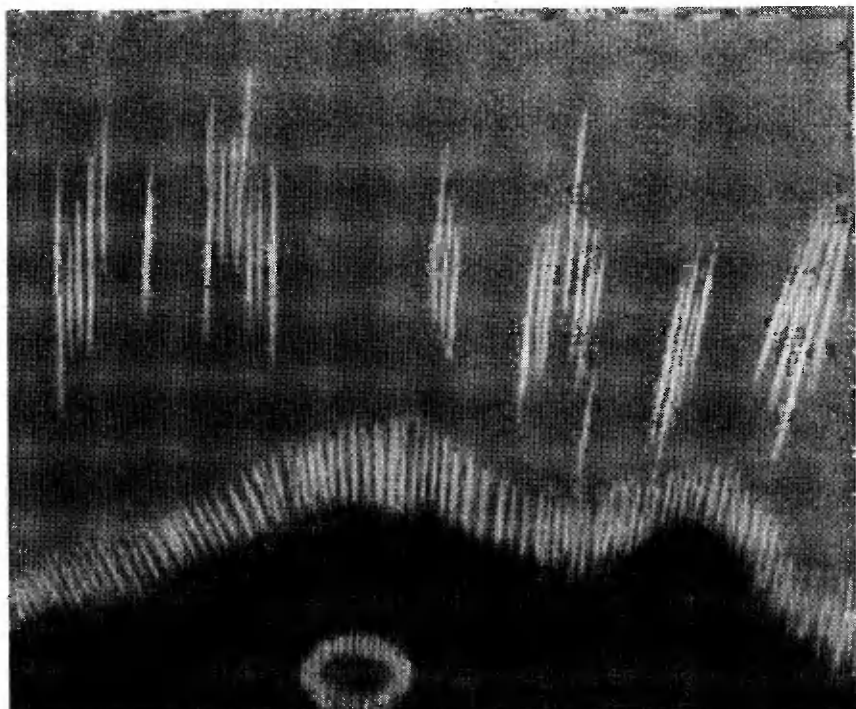


Рис. 188. Вид полярного сияния по зарисовке М. В. Ломоносова

Целый ряд соображений приводит к тому выводу, что поток частиц идет от Солнца сравнительно узким пучком, который следует за солнечным вращением.

Жители холодного пояса хорошо знакомы с *полярными сияниями*, наблюдаемыми на небе чаще всего около северного и южного полярных кругов, а иногда и в умеренных широтах в виде светлых дуг с лучами или широко развертывающихся светлых драпри, складки которых непрерывно колышутся. Продолжительность видимости их довольно изменчива: иногда та или другая форма сияния наблюдается в течение большого промежутка времени (до 3 дней); иногда же ярко вспыхнувшее сияние быстро исчезает, чтобы вновь появиться через некоторое время на короткий срок. Систематические наблюдения полярных сияний привели к тому выводу, что они происходят в

верхних слоях атмосферы, чаще всего на высотах 100—150 км, а в отдельных случаях много выше. Кривая частоты полярных сияний в общем следует за кривой изменения магнитного поля Земли и солнечных пятен и протуберанцев. Совершенно ясна связь всех этих явлений. Спектр полярных сияний содержит светлые полосы, принадлежащие молекулярному азоту, атомарному кислороду, ионизованным молекулам этих элементов и натрия. Это указывает на то, что молекулы и атомы газов в верхних слоях земной атмосферы подвергаются временами усиленному возбуждению под воздействием корпускулярных потоков от Солнца.

Переходя к объяснению всех этих явлений, нужно отметить, что еще в XVIII в. гениальный русский ученый М. В. Ломоносов уже наметил правильный путь к пониманию природы полярных сияний в работе «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих».

По современным теориям активные области солнечной поверхности выбрасывают потоки частиц, или корпускул, несущих электрические заряды и достигающих нашей Земли. Есть много данных в пользу того, что такими местами являются факелы, почти всегда сопровождающие пятна. Корпускулярный поток электронов, движущийся от Солнца с громадными скоростями, попадая в магнитное поле Земли, разделяется на части, которые направляются в полярные области. Двигаясь в этих областях спирально вокруг магнитных силовых линий, электроны проникают в верхние весьма разреженные области земной атмосферы, сталкиваются с отдельными частицами, вызывая их свечение.

В последнее время обнаружено, что причины полярных сияний заключаются не только в возбуждении частиц верхних слоев земной атмосферы, но и в прямом свечении атомов водорода, летящих от Солнца. Многолетние наблюдения показывают, что полярные сияния, так же как и магнитные возмущения, запаздывают по сравнению с прохождением пятен и факелов через центральную часть солнечного диска. Это подтверждает, что и полярные сияния вызываются не световыми лучами, а корпускулами, летящими от Солнца со скоростями хотя и большими, но все же гораздо меньшими скорости света.

На основании изучения распространения коротких радиоволн доказано существование назлектризованных слоев в верхних частях атмосферы. Эти слои электрически заряженных частиц воздуха или ионосферы образуются путем ионизации, производимой ультрафиолетовой радиацией Солнца. Ионосфера представляет собой электропроводящий слой, и радиоволны, достигая этого слоя, претерпевают те или иные изменения хода в зависимости от длины волны. Они могут пройти сквозь ионосферу, преломляться и отражаться. Путем многократных отражений между ионосферой и Землей они могут попадать в весьма отдаленные пункты, а ряд пунктов миновать. Таким образом, условия радиосвязи зависят от состояния и высоты ионосферы. Высоты же эти меняются от проникно-

вения ультрафиолетовых и еще более коротких волн солнечного излучения. Все это связано с процессами, происходящими на Солнце. Наиболее сильное действие на ионосферу производят хромосферные вспышки, влекущие за собой резкое увеличение ионизации в верхних слоях воздуха, что приводит к ослаблению и даже к потере приема радиосигналов, в особенности на коротких и средних волнах.

Большое практическое значение имеет и установление возможной связи с явлениями на Солнце таких явлений в земной атмосфере, как грозы и другие гидрометеорологические явления, определяющие погоду, климат и т. п. Несмотря на давние и многочисленные

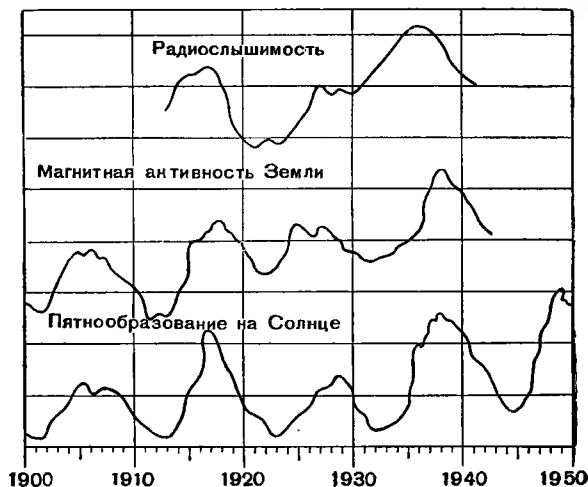


Рис. 189. Связь магнитной активности Земли и радиослышимости с пятнообразованием на Солнце

попытки в этом отношении, мы еще имеем сравнительно мало определенных результатов. Причина заключается прежде всего в необычайной сложности самих явлений погоды, которая характеризуется температурой, атмосферным давлением, влажностью, облачностью, ветром и другими элементами и является результатом встречи различных воздушных масс, приходящих иногда издалека. В то же время самые разнообразные местные условия оказывают существенное влияние. В результате явления эти, имея своим источником, как и все на Земле, солнечную энергию, возникают не непосредственно от Солнца, а через ряд промежуточных явлений, что делает неясной зависимость их от солнечной деятельности. Можно только указать, что такие крупные атмосферные явления, как вторжение арктических воздушных масс, видимо, связаны с процессами на Солнце. Важные работы в этом направлении проведены за последние годы астрономами Пулковской обсерватории. Более опреде-

ленный результат получен в отношении числа гроз, которые явно обнаруживают усиление в годы максимумов солнечных пятен.

Придавая большое значение всем этим естественным зависимостям, которые играют важную роль в народном хозяйстве и изучение которых получает максимальное развитие в Советском Союзе, надо в то же время резко и категорически отвести стремление некоторых буржуазных ученых и просто лжеученых найти связь с солнечной деятельностью целого ряда явлений не только в природе, но и в социальной жизни, не имеющих по существу никакого отношения к этим связям.

Пытались подгонять под периоды солнечных пятен размножение домашних животных, распространение эпидемий, цены на хлеб и даже революции. Нелепость этих утверждений становится совершенно очевидной, если вспомнить, что всякие эпидемии прекращаются с принятием определенных санитарных мер и с общим улучшением материально-бытовых условий трудящихся масс, а торговые кризисы — с ликвидацией капиталистической системы, что и доказано полностью в нашем социалистическом государстве, которое уже пережило больше чем три цикла солнечных пятен без всяких экономических кризисов, а идет ко все большему расцвету.

Только глубокое и всестороннее изучение самой природы Солнца и геофизических процессов может дать нам знание подлинно научно обоснованных связей, служащих основой для предсказания тех явлений, учет которых особенно важен для народного хозяйства.

Для систематического изучения всех явлений на Солнце организована в международном масштабе так называемая «служба Солнца»: целый ряд обсерваторий многих стран производят наблюдения по единому плану, которые затем подвергаются постоянной регулярной обработке.

В СССР «служба Солнца» была организована после Великой Октябрьской социалистической революции. Все наши крупные обсерватории, особенно южные, в Средней Азии и на Кавказе, в каждый ясный день выполняют наблюдения над Солнцем, подсчитывая и измеряя появившиеся на нем пятна, регистрируя и описывая наблюдаемые протуберанцы и пр. При такой коллективной работе почти ни один день не пропадает — на обширном протяжении нашей страны где-нибудь да бывает ясно небо, позволяющее наблюдать Солнце. Все эти наблюдения направляются для сводки и обработки их в центральную «службу Солнца», возглавляемую Комиссией по исследованию Солнца Академии наук СССР.

Нужно сказать, что многое, добытое наукой, используется, но еще больше есть такого, что требует дальнейшего изучения. Можно не сомневаться, что наша советская наука, получившая в условиях социалистического строя совершенно исключительные возможности, которые будут все возрастать, проникнет еще глубже в существующие связи между солнечными и земными явлениями и откроет новые пути использования их на службу трудящимся. Новые результаты по проблеме «Солнце и Земля» принесли работы, проведен-

ные по планам Международного геофизического года 1957—1958 гг. Небывалые до сих пор возможности открываются запуском искусственных спутников Земли.

§ 152. Использование солнечной энергии. Те источники энергии, которыми широко пользуется современная техника, представляют собой в конце концов все ту же энергию Солнца; например, энергия каменного угля и нефти — это солнечная энергия, преобразованная и накопленная доисторическими растениями или животными.

Если учесть поглощение солнечной радиации в атмосфере, средний коэффициент полезного действия при усвоении солнечной

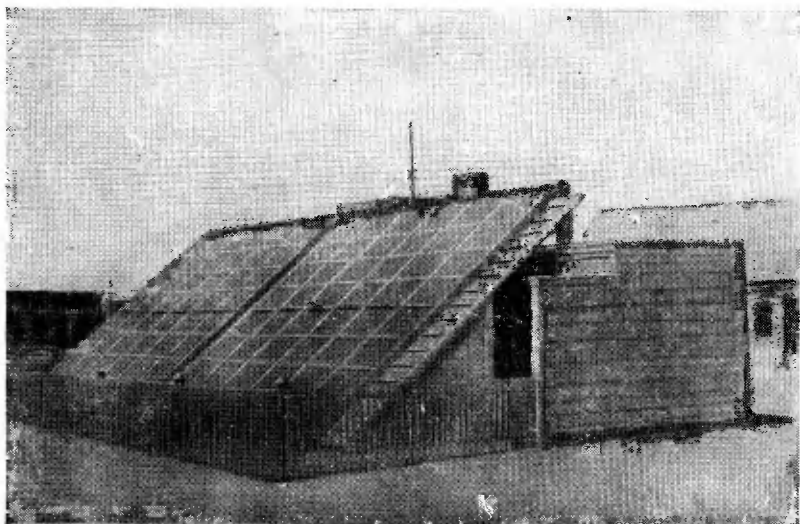


Рис. 190. Солнечная установка, дающая низкую температуру

энергии земным миром, то окажется усвоенным только около 2% солнечной радиации. Если же взять всю солнечную радиацию, попадающую на сушу, и учесть, какая часть суши покрыта растительностью, то процент использования солнечной энергии растениями снизится до 0,15%.

Главнейшие энергетические ресурсы в настоящее время имеют своим источником аккумуляцию солнечной энергии растениями (уголь, торф, дрова, нефть). К этим ресурсам надо добавить энергию рек — «белый уголь» и энергию ветра — «голубой уголь». Такие важнейшие ресурсы, как уголь и нефть, обречены на истощение, остальные также ограничены. Возникает проблема непосредственного использования лучистой энергии Солнца. Известно, что еще М. В. Ломоносов представил в Академию наук свое «Рассуждение о катоптрико-диоптрическом зажигательном инструменте» на основе применения вогнутых зеркал для концентрации солнечных

лучей. На таком принципе впоследствии стали строить «солнечные машины» с паровыми котлами в фокусе зеркала. Наметился и другой способ для практического решения той же проблемы — при помощи ящика, прикрытого стеклом. Солнечные лучи, наиболее интенсивные в видимой части спектра, хорошо пропускаются стеклом и нагревают внутреннюю поверхность ящика, которая излучает тепло обратно; но так как ее температура, конечно, много ниже температуры Солнца, то большая часть энергии приходится на далекую инфракрасную часть спектра. А этих лучей стекло почти не пропускает. Поэтому внутри ящика создается весьма высокая температура, которая тем выше, чем лучше тепловая изоляция дна и боковых стенок.

Опыты по непосредственному использованию солнечной энергии и построению рациональных конструкций солнечных машин проводятся в СССР. С довольно хорошим коэффициентом полезного действия построены солнечные машины Б. П. Вейнбергом. Особенно следует отметить работы К. Г. Трофимова и Ташкентской геофизической обсерватории. Главное внимание там было направлено на тепловую изоляцию. Со стороны падения солнечных лучей применяется

стеклянная защита в несколько рядов. При совершенно пасмурном небе температура внутри котла поднималась до 120°C , и даже зимой при -4°C и пасмурном небе вода доходила до точки кипения.

Конструкции эти нашли практическое применение. Сначала была построена небольшая опытная баня, в которой вода нагревалась исключительно солнечными лучами. Затем по этому же принципу в Средней Азии стали строиться не только прачечные, души, но и опреснители, имеющие громадное практическое значение для солончаковых районов; кухни, в которых все блюда приготавливаются солнечными лучами; фруктосушилки, дающие продукцию высокого качества и ускоряющие процесс сушки в несколько раз, а также холодильники. Выплавка серы производится при помощи гелиоуста-

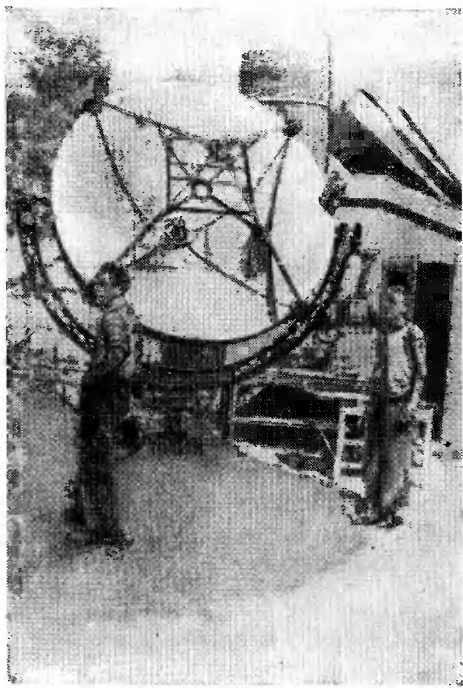


Рис. 191. Солнечная установка, дающая высокую температуру

новок так, что на эту выплавку не тратится ни топлива, ни воды. Таким образом, уже теперь районы, богатые солнцем, но бедные топливом, могут с успехом и экономически выгодно пользоваться солнечными лучами как непосредственным источником энергии.

Энергия солнечных лучей может быть непосредственно использована не только превращением ее в теплоту, но и в электричество и пр. В Академии наук СССР ведутся работы по усовершенствованию конструкций гелиотехнических сооружений, по изысканию новых, более эффективных способов прямого использования энергии солнечных лучей.

Советские гелиотехники на основе теоретических и экспериментальных исследований уже создали ряд опытных солнечных установок как низко- и среднетемпературных (до 100° и 150° — на принципе «горячего ящика»), так и высокотемпературных с применением зеркал. На рисунке 191 изображена установка для проведения опытов по сварке и плавке металлов, дающая температуры до 3200° в фокусе 2-метрового параболоидного зеркала. В настоящее время совершенствуются и разрабатываются солнечные установки для получения промышленного пара, для отопления зимой за счет летнего тепла и т. п.

Производятся работы по созданию в Армении весьма мощной солнечной станции с большими зеркальными установками для нагревания воды и получения пара для турбин электростанции мощностью свыше 1000 *квт*.

Несомненно, что дальнейшие усовершенствования приведут к созданию таких солнечных установок, которые войдут в строй той высокой техники, на основе которой движется вперед небывалыми темпами строительство коммунизма в нашей стране.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ОБЩИЙ ОБЗОР И ФИЗИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ЗВЕЗД

§ 153. Введение. До изобретения телескопа, т. е. до начала XVII в., звезды интересовали астрономов почти исключительно как опорные точки, при помощи которых можно было изучать видимые движения Солнца, Луны и планет, а также решать различные задачи практической астрономии. Лишь очень немногие мыслители обсуждали вопрос о строении звездного мира, но были принуждены ограничиваться малообоснованными догадками. Да и после изобретения телескопа развитие звездной астрономии в течение более чем полутора столетий происходило чрезвычайно медленно.

Основы звездной астрономии были заложены лишь в конце XVIII в. работами В. Гершеля (1738—1822). Он начал свою работу с сооружения больших зеркальных телескопов, при помощи которых он в течение своей жизни произвел четыре систематических обзора звездного неба, а также огромное количество детальных наблюдений светил. Разнообразный наблюдательный материал, полученный Гершелем, дал ему возможность получить представление о строении огромной звездной системы, в состав которой входят как наше Солнце и все наблюдаемые на небе отдельные звезды, так и те отдельные звезды, которые светят в общем сиянии Млечного Пути.

Доказав существование движения солнечной системы относительно ближайших звезд и правильно указав направление этого



Вильям Гершель
(1738 — 1822)

движения, Гершель получил возможность впервые в истории науки оценить величину звездных расстояний, так как перемещение Земли вместе с солнечной системой в пространстве вызывает видимые смещения звезд в обратном направлении. Гершель убедился также в существовании орбитального движения в двойных звездах. Тем самым на основе наблюдений небесных светил впервые было

доказано распространение закона всемирного тяготения за пределы солнечной системы.



В. Я. Струве
(1793—1864)

Непосредственным продолжателем дела Гершеля явился основатель и первый директор Пулковской обсерватории Василий Яковлевич Струве (1793—1864), впервые произведший многочисленные точные наблюдения двойных звезд, определивший расстояние до одной из звезд (Веги), высказавший исключительные по своей плодотворности мысли о существовании поглощения света в межзвездном пространстве. Огромное количество светил, подлежащих изучению, заставило применять в звездной астрономии статистические методы, впервые введенные в практику

тем же Гершелем. Развитие техники постройки астрономических инструментов позволило астрономии в последнее время шагнуть за пределы нашей звездной системы и заняться изучением разбросанных вокруг нее других бесчисленных звездных систем.

В XIX в. было положено начало применению ряда новых методов звездной астрономии (определению параллаксов, применению фотографии, спектральному определению скоростей звезд и др.). Развитие их сделало возможным не только несравненно более разностороннее изучение строения звездной системы, чем во время Гершеля, но и изучение физической природы звезд и вопросов об их происхождении и развитии.

§ 154. Число звезд. На обоих полушариях звездного неба число звезд, которые могут быть видны невооруженным глазом при средней остроте зрения, при совершенно ясной погоде, в безлунную ночь, заключается между пятью и шестью тысячами. Слабый туман или лунный свет уменьшает это число по крайней мере напо-

ловину. Так как над горизонтом мы видим одновременно только половину всей небесной сферы и так как близ горизонта слабые звезды исчезают, то при обычных условиях можно видеть от 2000 до 2500 звезд. Но с применением даже небольшого телескопа число видимых звезд очень сильно возрастает (рис. 193). Полевой бинокль показывает не меньше 50 000 звезд. Крупнейший из существующих телескопов — рефлектор с диаметром зеркала в 5 м — позволяет запечатлеть на фотографических пластинках при длительной экспозиции звезды, число которых на фотографиях всего неба превосходит 1 миллиард.

Чем слабее звезды, тем они многочисленнее. В таблице 12 приведены результаты подсчетов наиболее ярких звезд, видимых невооруженным глазом. Быстрое увеличение числа звезд по мере уменьшения их блеска продолжается и для звезд телескопических, как это показывает таблица 13, основанная на статистических подсчетах и содержащая в правых столбцах число звезд от самых ярких до указанной в левых столбцах предельной величины.

Таблица 12

Величина	Число звезд		
	В северном полушарии	В южном полушарии	На всем небе
1 (<1,5)	11	9	20
2 (1,5—2,5)	26	25	51
3 (2,5—3,5)	88	112	200
4 (3,5—4,5)	277	318	595
5 (4,5—5,5)	595	618	1213
6 (5,5—6,5)	1919	1721	3640
Итого . .	2916	2803	5719

Таблица 13

Предельная величина	Число звезд	Предельная величина	Число звезд
4,0	530	13,0	5 700 000
5,0	1 620	14,0	13 800 000
6,0	4 850	15,0	32 000 000
7,0	14 300	16,0	71 000 000
8,0	41 000	17,0	150 000 000
9,0	117 000	18,0	296 000 000
10,0	324 000	19,0	560 000 000
11,0	870 000	20,0	1 000 000 000
12,0	2 270 000		

§ 155. Спектры звезд. Классификация звездных спектров. Легко заметить, что яркие звезды имеют несколько различный цвет. Например, Вега и Сириус — белые, Капелла — желтая, Арктур — оранжевый, Бетельгейзе, Антарес и Альдебаран — красные. Более детальное представление об излучении звезд дает нам спектральный анализ, и естественно ожидать, что различия в цвете звезд должны обуславливаться различием их спектров. Спектры всех звезд, за редкими исключениями, имеют в основном тот же характер, что и спектр Солнца (спектр поглощения), но в спектрах красных звезд по сравнению со спектрами остальных звезд красный конец спектра интенсивнее, ярче синего конца спектра.

С другой стороны, в спектрах различных звезд темные линии неодинаковы. В некоторых случаях спектры звезд представляют

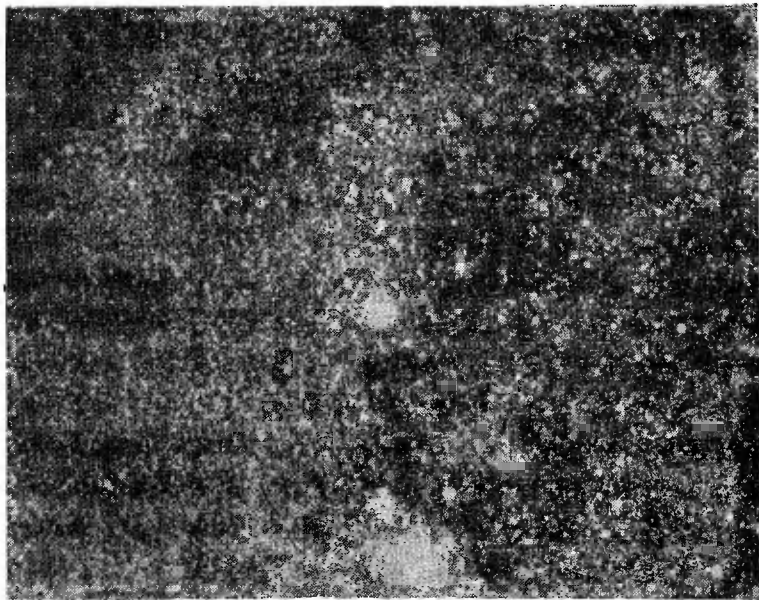
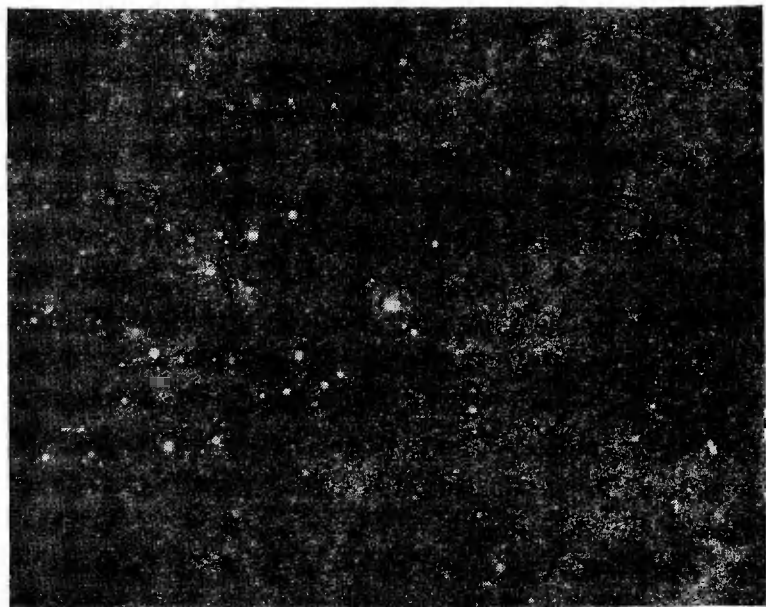


Рис. 193. Фотографии звездного неба около α Лебеда с различными экспозициями:
слева — с короткой экспозицией; справа — с длительной экспозицией

собой точную копию солнечного спектра, в других же случаях они сильно отличаются от спектра Солнца расположением линий.

Разнообразие звездных спектров и вместе с тем наличие среди них целого ряда сходных спектров, естественно, вынуждает каким-то образом классифицировать их. Классификация звездных спектров — это своего рода астрофизическая азбука. Как мы увидим дальше, каждый спектральный класс характеризует ряд физических особенностей звезды, и поэтому, указав, к какому спектральному классу относится та или иная звезда, мы чрезвычайно сжато описываем физическую природу этой звезды. Ввиду этого спектральная классификация должна быть усвоена очень твердо.

В основу классификации положено следующее:

Первое. Подавляющее большинство звезд имеет спектры, состоящие из непрерывного фона, пересеченного линиями поглощения. Это указывает, что звезды, как самосветящиеся раскаленные тела, подобно Солнцу, окружены более холодными атмосферами, вызывающими в спектрах линии поглощения.

Второе. Все линии звездных спектров в настоящее время отождествлены с линиями известных на Земле химических элементов. Это показывает, что вещество как на Земле, так и на Солнце и на звездах едино в своей материальности и его изменения происходят по тем же физическим законам, которые мы устанавливаем у себя на Земле. Этот факт является одним из важнейших доказательств познаваемости Вселенной.

Чрезвычайно многочисленные звездные спектры могут быть уложены в сравнительно небольшое число спектральных классов. При этом спектры подавляющего большинства звезд могут быть расположены в один непрерывный ряд. Это дает возможность, имея в своем распоряжении спектры множества звезд, проследить непрерывный переход от одного типичного спектра к другому.

Спектральные классы обозначаются буквами латинского алфавита, причем типичные для данного класса спектры обозначаются этими же буквами, с приставкой справа цифры 0, например: A0, F0 и т. д. Первоначально классификация производилась просто по внешнему виду спектра звезд. Впоследствии выяснилось, что главной причиной различия звездных спектров является различие звездных температур. По ряду причин оказалось удобнее расположить спектральную классификацию в порядке изменения температур звезд. Это привело к тому, что уже вошедшие в практику буквенные символы пришлось перерасположить в новом порядке, который не совпадает с алфавитным порядком.

Основным критерием для классификации звездных спектров являются линии поглощения, а именно: каким химическим элементам эти линии принадлежат и какова их относительная интенсивность. Спектральная классификация, таким образом, возникла чисто эмпирически и лишь значительно позднее была обоснована

теоретически. Последовательность основных классов современной спектральной классификации звезд такова:

O—B—A—F—G—K—M.

Она представляет постепенное и непрерывное изменение видов звездных спектров. В этой последовательности цвет звезды изменяется от голубого и белого через желтый ко все более и более

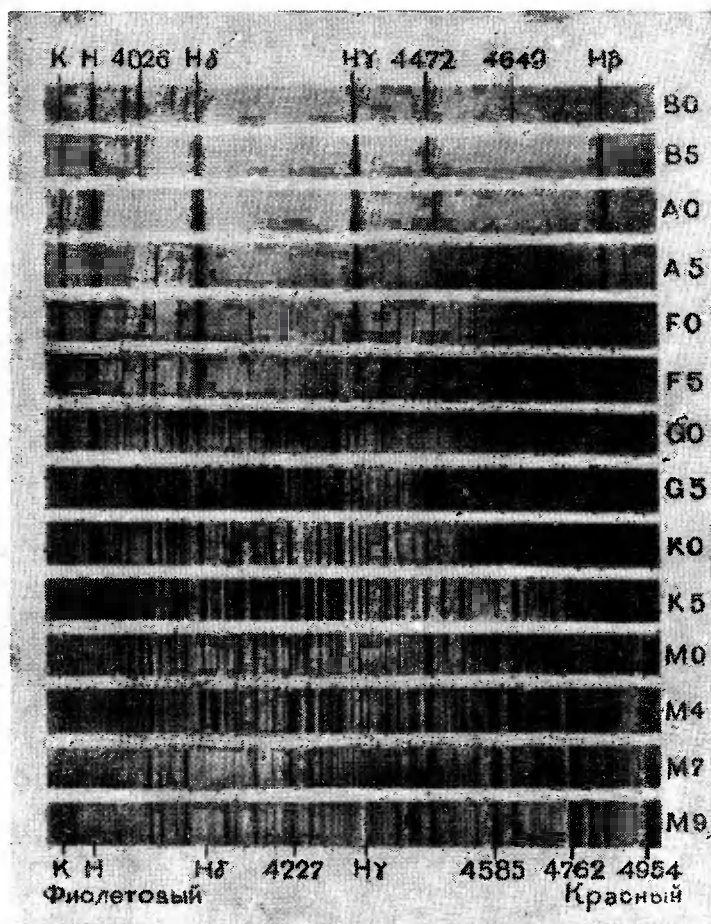


Рис. 194. Спектральная классификация звезд

красному. В том же направлении уменьшается и температура, начиная от наиболее горячих звезд класса O к наиболее холодным звездам класса M (рис. 194).

Кроме этих основных спектральных классов, встречаются, но уже значительно реже, спектральные классы R, N и S.

Спектральные классы О, В, А и F называются ранними, а остальные — поздними, что означает лишь их последовательность в классификации. В таблице 14 приведены характерные признаки основных спектральных классов звезд, включающие для получения более полного представления и соответствующие им цвета и средние температуры в округленных цифрах.

Нужно помнить, что в таблице 14 отмечены лишь те линии, которые являются наиболее интенсивными в спектрах данных звезд по сравнению со спектрами других звезд. Например, линии водорода присутствуют в спектрах звезд всех спектральных классов, но их максимальная интенсивность обнаруживается в спектральном классе А0 (см. третий сверху спектр на рис. 194). Между

Таблица 14

Спектральная классификация звезд

Спектральный символ	Характерные линии в максимуме своей интенсивности	Самые яркие из типичных звезд	Цвет	Температура
О	Ионизированный He^+ , многократно ионизированные О и N	λ Ориона	Голубоватый Белый	30 000°
B0	He, ионизированные О и N	Спика ¹		20 000°
A0	H, линии водорода очень темные и широкие	Сириус, Вега		10 000°
F0	Ca^+ , Mg^+ и другие ионизированные металлы	Процион ²	Желтоватый	8 000°
G0	Нейтральные металлы (Fe, Ca, Mg и др.)	Капелла, Солнце ³	Желтый	6 000°
K0	Нейтральные металлы и слабые полосы окиси титана TiO_2	Арктур	Оранжевый	4 000°
M0	Сильные полосы окиси титана	Поллукс Бетельгейзе, Антарес	Красный	3 000°
R0	Полосы циана и углерода	BD+42° 2811	Красный	3 000°
N0	Сильные полосы циана и углерода	19 Рыб	Густокрасный	2 000°
S0	Полосы окиси циркона	—	Красный	2 000°

¹ Спектр Спики в действительности слегка более поздний — B2, а не B0.

² Точнее, спектр Проциона — F5, т. е. средний между F0 и G0.

³ Точнее, спектр Солнца — G2.

тем в спектре Солнца линии водорода есть тоже, но они находятся там уже не на первом плане.

Спектры промежуточного класса обозначаются буквами с прибавлением цифры, причем спектральный интервал между двумя основными спектральными классами разбивается на 10 частей. Например, спектр A5 представляет спектр типа как раз промежуточного между типичными спектрами A0 и F0. Спектр A8 представляет спектр, более близкий к F0, чем к A0, и т. д.

Классификация деталей. Звезды, принадлежащие к одному и тому же спектральному подклассу, но отличающиеся какими-либо деталями, характеризуются добавочными символами. Например, если в спектре наряду с темными линиями встречается одна или несколько ярких линий, то добавляется буква *e* (emission — излучение), например M7e. Если в спектре замечена какая-либо аномалия, особенность, то это вызывает прибавление буквы *p* (латинское particularis, т. е. особенный), например B3p. Как мы увидим далее, спектры звезд так называемых сверхгигантов, гигантов и карликов, принадлежащих к одному и тому же спектральному классу, отличаются друг от друга некоторыми деталями. Ввиду этого спектры звезд-сверхгигантов обозначаются приставкой *s*, например sK5; спектры звезд-гигантов обозначаются приставкой *g*, например gK5; спектры звезд-карликов обозначаются приставкой *d*, например dK5.

Как уже отмечалось выше, спектральные классы R, S и N встречаются у звезд редко. По-видимому, классы R и N, с одной стороны, и класс S — с другой, представляют собой как бы два ответвления основной последовательности. Таким образом, схематически спектральную классификацию большинства звезд можно представить так: O—B—A—F—G—K—M. Это значит, что от O до M существует непрерывная последовательность.

Весьма редкий, но тем не менее чрезвычайно важный тип звезд представляют собой звезды класса O. Среди них часть принадлежит к звездам с обычным спектром поглощения, характеризваемым линиями, отмеченными в таблице 14. Однако к этому же спектральному классу относятся звезды, характеризваемые теми же линиями спектра, но не темными, а яркими. В некоторых случаях эти яркие линии имеют даже вид широких ярких полос. У некоторых звезд яркими бывают только некоторые линии, например линии водорода яркие, а линии гелия темные. У других же звезд все линии спектра оказываются яркими, но опять-таки расположенными на фоне непрерывного спектра. Такие звезды с широкими яркими линиями или полосами в спектре, аналогичные обычным звездам класса O, называются *звездами типа Вольфа—Райе*, по именам двух ученых, которые их впервые исследовали.

§ 156. Собственные движения звезд. С глубокой древности звезды считались в отличие от планет неподвижными, сохраняющими неизменным свое взаимное расположение. Только в начале XVIII в. английский астроном Галлей из сравнения наблюдений того времени с наблюдениями древних обнаружил, что за полторы тысячи лет, протекших от эпохи Птолемея, некоторые из наиболее ярких звезд заметно переместились по отношению к остальным звездам.

Изменение положения звезд на небе происходит очень медленно вследствие большой отдаленности звезд от нас. Поэтому для невооруженного глаза эти изменения становятся заметными только на протяжении по крайней мере нескольких столетий (рис. 195). Но точные телескопические наблюдения позволяют определить перемещения звезд из сопоставления наблюдений, разделенных промежутком в несколько десятков лет. *Собственным движением* звезды называется ее перемещение по небесной сфере за год, выра-
женное в секундах дуги.

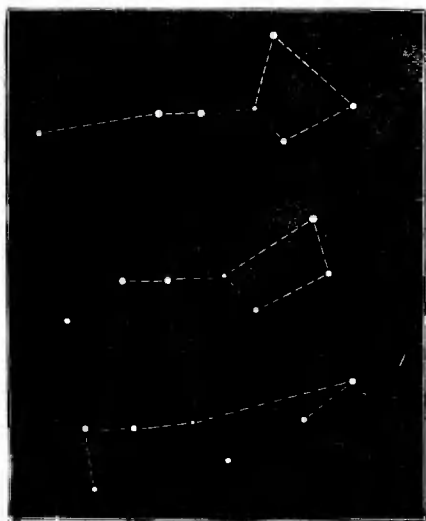


Рис. 195. Изменение вида созвездия Большой Медведицы:
вверху — 50 000 лет назад; в середине — в настоящее время; внизу — через 50 000 лет

Собственные движения звезд различны и по величине и по направлению. Наибольшее из ныне известных собственных движений принадлежит одной слабой звездочке 10-й величины в созвездии Змееносца и составляет $10''.27$ в год; большинство же измеренных собственных движений — порядка сотых долей секунды дуги в год.

Если известен параллакс звезды π и величина ее собственного движения μ , то нетрудно найти в линейных единицах (например, в километрах в секунду) проекцию скорости звезды на небесную сферу (т. е. перпендикулярно к лучу зрения). В самом деле, годовой путь звезды (обозначим его через s) с Земли виден

под углом μ , а одна астрономическая единица ($149\frac{1}{2}$ млн. км) со звезды видна под углом π , ибо это и есть параллакс звезды. Следовательно, мы можем написать:

$$\frac{s}{149\,500\,000} = \frac{\mu}{\pi},$$

откуда находим:

$$s = \frac{149\,500\,000 \mu}{\pi}.$$

Разделив этот путь на число секунд в году, получим тангенциальную, или поперечную, скорость звезды в километрах в секунду, которую обозначим буквой V_t :

$$V_t = \frac{149\,500\,000}{365 \cdot \frac{1}{4} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} \cdot \frac{\mu}{\pi} = 4,74 \frac{\mu}{\pi}.$$

Такие вычисления показывают, что в большинстве случаев скорости звезд выражаются несколькими километрами или десятками километров в секунду, изредка доходя до нескольких сотен километров в секунду. Таблица 15 содержит список звезд, имеющих собственные движения больше $4''$ в год.

§ 157. **Лучевые скорости звезд.** Как уже указывалось, собственное движение не выражает *полной скорости* звезды в пространстве (V), а выражает лишь проекцию этой скорости на небесную сферу, т. е. *поперечную слагающую скорости* (V_p), перпендикулярную к лучу зрения, проведенному от наблюдателя к звезде. Проекция полной скорости на луч зрения называется *лучевой скоростью* и обозначается буквой V_r .

Движение звезды по лучу зрения, очевидно, не меняет ее видимого положения на небе; это движение может быть определено только по принципу Доплера—Физо из измерения смещений линий в спектре звезды. При этом лучевая скорость определяется сразу в километрах в секунду без знания параллакса звезды. Хорошая спектрограмма позволяет определить лучевую скорость звезды с ошибкой не более $1\text{--}2$ км/сек.

Зная лучевую скорость звезды V_r и ее поперечную слагающую скорости V_p , можно найти полную скорость звезды по формуле геометрического сложения векторов:

$$V^2 = V_r^2 + V_p^2.$$

Условились лучевые скорости звезд, движущихся по направлению к Земле, считать отрицательными (расстояние уменьшается), а лучевые скорости звезд, движущихся от Земли, — положительными (расстояние увеличивается).

§ 158. **Движение солнечной системы.** Солнце, будучи одной из звезд, также должно обладать поступательным движением относительно ближайших к нему звезд. А если так, то на наблюдаемых нами движениях звезд должно отражаться это движение Солнца вместе со всей солнечной системой.

Нетрудно сообразить, что на собственных движениях звезд эффект движения Солнца сказывается в том, что звезды в той стороне неба, куда движется Солнце, в общем как бы расступаются перед нами, а на противоположной стороне — как бы сдвигаются. Наибольший эффект влияния движения Солнца на собственные движения звезд должен наблюдаться у звезд, близких к большому кругу небесной сферы, перпендикулярному к направлению движения Солнца.

На лучевых скоростях движение Солнца сказывается в том, что звезды в той стороне неба, куда движется Солнце, в среднем приближаются к нам, а на противоположной — удаляются.

Точка небесной сферы, по направлению к которой движется Солнце, называется *апексом* движения Солнца, а противоположная

Наибольшие собственные движения звезд

Звезда	Видимая величина	Спектральный класс	Годичное собственное движение	Параллакс π	Поперечная скорость в км/сек	Лучевая скорость в км/сек	Полная скорость в км/сек
Звезда Барнарда . .	9 ^m ,7	M5	10",27	0",546	90	—110	142
Звезда Каптейна . .	9,2	M0	8,75	0,262	158	+242	289
Грумбридж 1830 . .	6,5	G6	7,04	0,108	308	—97	323
Лакайль 9352 . . .	7,4	M2	6,91	0,278	118	+10	118
Кордоба 32 416 . .	8,3	M3	6,11	0,220	132	+26	135
Росс 619	12,6	M5	5,40	0,154	166	—	—
*61 Лебедя A и B .	5,6; 6,3	K6; M0	5,21	0,300	82	—64	104
Лаланд 21 185 . . .	7,6	M2	4,77	0,388	58	—87	104
ε Индейца	4,7	K5	4,69	0,288	77	—39	88
Вольф 359	13,5	M7e	4,67	0,403	57	—90	107
*Лаланд 21 258 . .	8,8; 14,8	M1; M6e	4,54	0,174	124	+62	137
** α^2 Эридана A, B и C	4,5; 9,5 11,2	K0; A2, M5e	4,08	0,202	96	—42	103

Все эти звезды имеют большие параллаксы, т. е. принадлежат к числу ближайших к нам. Таким образом, большое собственное движение, как правило, указывает на близость звезды к нам,—вывод, весьма важный для отыскания близких звезд.

* —двойная звезда; ** тройная звезда

ей — *антиапексом*. Так как звезды сами движутся в пространстве по всевозможным направлениям, эффект движения Солнца можно обнаружить только из рассмотрения большого числа звезд, пользуясь статистическими методами.

Рядом исследователей по мере накопления материала о звездных движениях неоднократно производились определения величин, характеризующих движение солнечной системы. Из анализа собственных движений и лучевых скоростей нескольких тысяч звезд различные исследователи находят координаты апекса вблизи

$$\alpha = 270^\circ; \quad \delta = +30^\circ$$

и скорость Солнца: около 19,5 км/сек.

Вообще можно сказать, что Солнце имеет поступательное движение в пространстве, увлекая за собой все планеты в том направлении, где на небесной сфере граничат созвездия Лиры и Геркулеса, со скоростью около 20 км/сек.

§ 159. Тригонометрические параллаксы звезд. Наиболее прямой метод измерения звездных расстояний — это метод *тригонометрический*. Он сводится к измерению кажущихся смещений звезды на небесной сфере вследствие годичного движения Земли вокруг

Солнца. Напомним, что результаты измерений этих «параллактических смещений» обычно даются в виде *годового параллакса* звезды — так называется наибольший угол, под которым со звезды видна большая полуось земной орбиты. Но расстояния до звезд огромны в сравнении с радиусом земной орбиты, и, следовательно, параллактические смещения чрезвычайно малы. Только сто с небольшим лет назад развитие астрономической техники позволило, наконец, обнаружить их у нескольких звезд.

В. Я. Струве в России по наблюдениям 1835—1838 гг. определил годичный параллакс Веги (α Лиры), Бессель в Германии по наблюдениям 1837—1838 гг. определил параллакс звезды 61 Лебедя и англичанин Гендерсон на мысе Доброй Надежды (южная Африка) определил в 1839 г. параллакс блестящей южной звезды α Центавра. Работы названных астрономов составили эпоху в истории астрономии, и не столько из-за подтверждения ими учения Коперника (это учение в XIX в. уже не нуждалось в новых доказательствах), сколько потому, что они явились первыми в истории науки определениями звездных расстояний.

К настоящему времени число звезд с измеренными тригонометрическими параллаксами превысило 5000.

В наши дни определения звездных параллаксов ведутся почти исключительно при помощи фотографии и притом по *дифференциальному методу*, т. е. параллактическое смещение выводится не из изменения координат звезды на небе (ее прямого восхождения и склонения), а по кажущемуся перемещению исследуемой звезды на фоне нескольких соседних очень слабых и, как правило, более далеких звездочек. Последний способ предпочтительнее, потому что малые угловые расстояния данной звезды от соседних «звезд сравнения» можно измерить во много раз точнее, чем координаты звезды. Правда, звезды сравнения сами могут иметь некоторое параллактическое смещение, но это смещение можно оценить и учесть.

Из исследованных до настоящего времени звезд наибольшими параллаксами обладают две звезды: α Центавра и находящаяся неподалеку от нее звезда 11-й величины, названная «ближайшей» (Proxima) Центавра. Параллакс этих двух звезд почти одинаковы и равны $0''.76$. Под таким углом нам представляется толщина человеческого волоса с расстояния около 18 м.

Однако при соблюдении всевозможных предосторожностей точная астрономическая техника наших дней позволяет измерить параллаксы, во много раз меньшие. Ошибка определения параллакса из серии наблюдений с наилучшими инструментами составляет около $0''.02$.

В главе IV для вычисления расстояния звезды по параллаксу была выведена формула:

$$\Delta = 206\,265 \frac{a}{\pi''},$$

в которой π'' — годичный параллакс звезды, выраженный в секундах, а a — так называемая астрономическая единица, т. е. расстояние от Земли до Солнца.

Для α Центавра мы имеем $\pi'' = 0'',76$; следовательно, $\Delta = = 396 \cdot 10^{11}$ км. Таково расстояние до ближайшей звезды. Ясно, что выражать столь огромные расстояния в километрах или даже в астрономических единицах нецелесообразно, поэтому были введены специальные единицы длины: *парсек* и *световой год*.

Парсек (от слов «параллакс» и «секунда») *есть расстояние, соответствующее годичному параллаксу в одну секунду*. По вышеприведенной формуле находим, что 1 парсек равен 206 265 астрономическим единицам, или $30,8 \cdot 10^{12}$ км. Из этой же формулы легко получить, что если расстояние выражать в парсеках, то $\Delta = \frac{1}{\pi''}$,

т. е. расстояние, является обратной величиной параллакса, выраженного в секундах. *Световым годом* называется расстояние, проходимое световым лучом в течение одного года. Так как скорость света равна 300 000 км/сек, то один световой год равен $300\,000 \cdot 365\frac{1}{4} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60$ км, или $9,4 \cdot 10^{12}$ км. Нетрудно подсчитать, что 1 парсек = 3,26 светового года и что расстояние α Центавра составляет 1,32 парсека, или 4,3 светового года. За исключением нескольких десятков наиболее близких звезд остальные звезды в десятки, сотни и тысячи раз дальше от нас.

Таблица 16

Ближайшие звезды

Звезда	Видимая величина	Спектральный класс	Параллакс	Расстояние в световых годах	Абсолютная величина	Светимость
«Ближайшая» Центавра	10 ^m ,5	M	0'',762	4,2	14 ^m ,9	0,00008
α Центавра	{ 0,3 1,7	G5 K4	0,756	4,3	{ 4,7 6,1	{ 1,0 0,3
Звезда Барнарда . .	9,7	M5	0,546	6,0	13,4	0,0003
Вольф 359	13,5	M7e	0,403	8,2	16,5	0,00002
Лаланд 21 185	7,6	M2	0,388	8,3	10,6	0,0044
Сириус	{ -1,6 8,0	A2 F0	0,375	8,7	{ 1,3 10,9	{ 23 0,003

§ 160. Абсолютные величины и светимости звезд. Блеск звезд, а следовательно, и их видимые величины зависят не только от их силы света, но и от их расстояний. Поэтому для сравнения между собой силы света различных звезд надо все их отнести к одному и тому же расстоянию. Таким стандартным расстоянием условились считать расстояние в 10 парсеков, соответствующее параллаксу в 0'',1. Очевидно, что звезды, находясь на этом расстоянии, имели

бы иной блеск и иную видимую величину, чем они имеют в действительности. *Абсолютной величиной* принято называть ту видимую величину звезды, которую она имела бы, находясь на расстоянии 10 парсеков. Абсолютные величины звезд обозначаются буквой M .

Мы знаем (см. § 93), что отношение блеска двух звезд может быть выражено через их видимые величины формулой (1):

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{m_2 - m_1}. \quad (1)$$

Применяя это соотношение к одной и той же звезде при условии, что в одном случае она находится на своем действительном расстоянии Δ , а в другом — на расстоянии 10 парсеков, получаем:

$$\frac{E_0}{E} = 2,512^{m-M},$$

где E и E_0 — видимый блеск звезды на расстоянии Δ и 10 парсеков.

Но блеск звезд изменяется обратно пропорционально квадратам их расстояний, поэтому:

$$\frac{E_0}{E} = \frac{\Delta^2}{10^2},$$

где Δ выражена в парсеках.

Приравнивая друг к другу правые части двух последних равенств, получаем:

$$\frac{\Delta^2}{10^2} = 2,512^{m-M}.$$

Логарифмируя это выражение, находим:

$$2 \lg \Delta - 2 = \lg 2,512 (m - M),$$

или, так как $\lg 2,512 = 0,400$,

$$m - M = 5 (\lg \Delta - 1). \quad (2)$$

Так как расстояние звезды Δ выражено в парсеках, имеет место равенство $\Delta = \frac{1}{\pi''}$, или $\lg \Delta = -\lg \pi''$, и выражение (2) может быть приведено к виду

$$m - M = -5 (\lg \pi'' + 1). \quad (3)$$

Если видимая величина звезды определена из фотометрических измерений, а параллакс — способом, описанным в предыдущем параграфе, то абсолютная величина может быть получена по формуле (3). С другой стороны, если бы мы могли каким-нибудь иным способом узнать абсолютную величину звезды, то по этой же формуле мы смогли бы найти ее параллакс.

Чтобы определить абсолютную величину Солнца, надо взять формулу (2). Подставив в нее данные для Солнца видимую звездную величину $m_{\odot} = -26,8$ и расстояние $\Delta_{\odot} = \frac{1}{206\,265}$, находим:

$$M_{\odot} = 4,7.$$

Это значит, что на расстоянии 10 парсеков Солнце было бы видно, как звезда, близкая по своему блеску к 5-й величине.

Обозначая через L отношение силы света звезды E к силе света Солнца $E_{\odot}$ и относя звезду и Солнце на расстояние 10 парсеков, имеем по формуле (1):

$$L = \frac{E}{E_{\odot}} = 2,512^{4,7-M},$$

или, после логарифмирования этого выражения:

$$\lg L = 0,4(4,7 - M).$$

Величина L , характеризующая силу света звезды по отношению к Солнцу, называется ее *светимостью*.

Вычисленные по формулам (2) и (3) абсолютные величины и светимости звезд оказались очень разнообразными (таблицы 16 и 17).

Таблица 17

Абсолютные величины и светимости некоторых звезд

Звезда	Спектр. класс	Абсолют- ная вели- чина M	Светимость ($\odot=1$)
Ригель	B8	-5,8	16 000
Бетельгейзе	M2	-3,9	2 800
Арктур	K0	0,0	80
Сириус	A2	+1,3	23
Альтаир	A6	+2,5	8
Солнце	G0	+4,7	1
ε Индейца	K5	+7,0	0,13
Звезда Барнарда	M5	+13,4	0,0003
Вольф 359	M7	+16,5	0,00002

§ 161. Спектральные параллаксы звезд. После тщательного исследования вида линий в спектрах различных звезд *одного и того же спектрального класса* обнаружилось, что отношение интенсивностей некоторых спектральных линий находится в тесной зависимости от светимости звезд. Вместе с тем интенсивность других линий от этой зависимости совершенно свободна и, следовательно, может служить основой для сравнения при определении интенсивности первых линий.

После того как это было установлено по звездам с известными тригонометрическими параллаксами (т. е. известными абсолютными величинами), стало возможным по отношению интенсивности избранных линий в спектре какой-либо звезды определять ее абсолютную величину. А сравнивая абсолютную величину звезды с ее видимой величиной, нетрудно, как мы видели, по формуле (3) вычислить параллакс звезды. По сравнению с тригонометрическим методом определения звездных расстояний этот метод чрезвычайно выгоден, так как требует только наличия достаточно хорошей спектрограммы звезды. Но главное достоинство метода — это его приложимость и к близким, и к далеким звездам.

Простота спектрального метода определения параллакса делает его особенно пригодным для массовых определений звездных параллаксов. К настоящему времени определено свыше 30 000 спектральных параллаксов (в ряде случаев несколько параллаксов для одной и той же звезды), что дало неоценимый материал для изучения распределения звезд в пространстве, их движения и т. д.

Насколько хорошо согласуются спектральные параллаксы с тригонометрическими, показывает таблица 18.

§ 162. Цвета и показатели цвета звезд.

Как уже говорилось выше, простым глазом в цвете ярких звезд можно заметить различия, обусловленные

неодинаковостью распределения энергии в их спектрах. В телескоп можно заметить цвет и более слабых звезд. Одной из наиболее красных звезд «рубинового» цвета является переменная звезда μ Цефея (ее блеск в незначительных пределах изменяется около 4-й величины). Уже в бинокль можно видеть, насколько она интенсивно красная. В телескоп это можно заметить еще отчетливее.

Словесные описания цвета неточны и неопределенны, вследствие чего для точных количественных исследований пользуются понятием показателя цвета. Напомним, что *показателем цвета называется разность: фотографическая звездная величина минус визуальная звездная величина*. Условились считать, что для звезд класса A0, которые имеют чисто белый цвет, фотографическая звездная величина равна визуальной и, следовательно, для звезд класса A0 показатель цвета равен нулю. Отсюда ясно, что голубоватые звезды (встречающиеся очень редко) имеют отрицательный показатель цвета, а желтоватые и красноватые — положительный. Чем звезда краснее, тем больше ее показатель цвета. Для обычных

Таблица 18

Сравнение спектральных и тригонометрических параллаксов

Звезда	Спектральный параллакс	Тригонометрический параллакс
Капелла	0",076	0",073
Бетельгейзе	0,012	0,005
Сириус	0,376	0,375
Процион	0,347	0,288
α Центавра	0,794	0,756
Поллукс	0,126	0,093

красных звезд, в среднем, показатель цвета составляет около 1,5 звездной величины. В последние годы при помощи фотографических пластинок, чувствительных к инфракрасным лучам, были обнаружены густо-красные звезды, показатель цвета которых доходит до +6,5 звездной величины.

Сопоставление цвета звезд с их спектральным классом и с показателями цвета обнаруживает зависимость, которая характеризуется таблицей 19.

Таблица 19

Показатели цвета звезд

Спектральные классы	Цвета	Температуры гигантов	Показатели цвета	
			гигантов	карликов
B0	Голубовато-белый . . .	24 000°	—0 ^m ,33	—
A0	Белый	12 000	0,00	—
F0	Желтовато-белый . . .	8 000	+0,33	—
G0	Желтый	5 900	+0,67	+0 ^m ,57
K0	Желтовато-красный . .	4 400	+1,12	+0,78
M0	Красный	3 300	+1,73	+1,45

Мы видим, что звезды класса В являются голубовато-белыми, звезды с таким спектром, как наше Солнце, т. е. класса G, желтыми и самыми красными являются звезды спектрального класса М. Впрочем, еще более красными оказываются немногочисленные звезды спектральных классов N и S.

Показатель цвета является грубым указанием на распределение энергии в спектре звезды. Зная восприимчивость глаза и фотографической пластинки к лучам различных длин волн, можно из показателя цвета вычислить отношение яркостей двух различных участков звездного спектра. Это в свою очередь позволяет приблизительно определить распределение энергии во всем спектре звезды, если он недоступен непосредственному исследованию. Для слабых звезд, спектр которых не удастся сфотографировать, об их температуре и спектральном классе судят по показателю цвета хотя бы на основании таблицы 21 на стр. 362. Например, если показатель цвета звезды оказывается равным +0^m,67, то можно ожидать, что спектр звезды близок к солнечному, т. е. к классу G0.

§ 163. Причина возникновения темных и ярких линий в звездных спектрах. а) Темные линии. Появление темных линий в звездных спектрах имеет такое происхождение: на каждый данный атом звездной атмосферы энергия, приходящая из недр звезды, падает, так сказать, снизу. Поглотив энергию определенной длины волны, атом затем излучает ее по всем направлениям, и поэтому по определенному направлению — к наблюдателю — атомы из-

лучают меньше энергии, чем они ее получили, вследствие чего в спектре получается темная линия. Очевидно, что чем больше атомов данного рода при поглощении энергии возбуждается до соответствующего высшего энергетического состояния, тем больше будет производимое ими поглощение и тем темнее будут спектральные линии. Вследствие теплового движения атомов длина волны поглощаемой ими энергии несколько отличается от длины волны той энергии, которую атом способен поглотить в «неподвижном» состоянии. Ввиду этой, а также ряда других причин, спектральные линии являются узкими полосками конечной ширины, наиболее темными в центре.

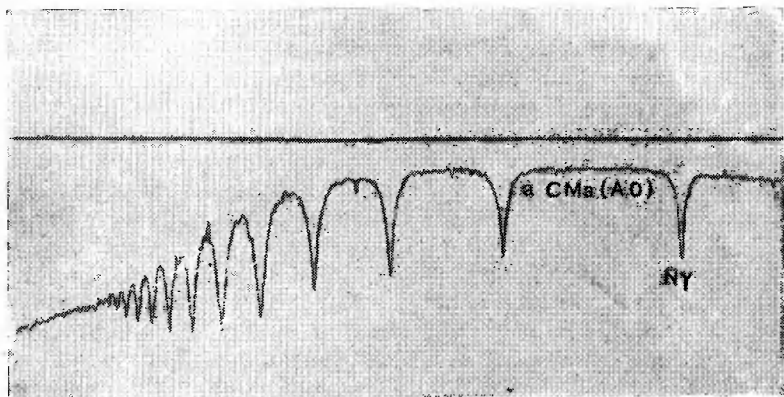


Рис. 196. Микрофотограмма спектра Сириуса

Полное поглощение, производимое атомами в данной линии, выражается площадью кривой, представляющей распределение энергии в функции длины волны внутри данной темной линии по отношению к прилегающему к ней фону непрерывного спектра. Измерение контуров таких линий представляет чрезвычайно важную задачу астрофизики, так как, теоретически анализируя контуры этих линий с точки зрения атомной физики и теории строения звездных атмосфер, можно выяснить много деталей физического строения звездных атмосфер. На рисунке 196 представлена микрофотограмма спектра Сириуса. Микрофотограмма спектра есть автоматически полученная на саморегистрирующем микрофотометре запись распределения почернений на негативе спектра Сириуса. Чем ярче было какое-либо место в спектре Сириуса, тем выше на этом чертеже идет кривая, хотя высота такой кривой зависит еще и от чувствительности пластинки к энергии данной длины волны. На рисунке 196 мы видим зигзаги кривой книзу. Это зарегистрированные водородные линии поглощения. По такой микрофотограмме, зная характеристическую кривую фотопластинки,

можно, измерив расстояние по вертикали от центра линии (от самой нижней ее точки) до уровня непрерывного спектра по соседству с этой линией, определить, каково поглощение в центре каждой водородной линии.

Если измерить площадь всего этого контура, то подобным же образом можно определить полное поглощение, производимое звездной атмосферой в спектральной линии.

б) Яркие линии. Если вообразить себе хромосферу Солнца очень обширной, имеющей толщину порядка солнечного радиуса, то она будет испускать гораздо больше света, чем испускает его сейчас. В таком случае, если бы мы могли наблюдать Солнце с такого же расстояния, с какого мы наблюдаем звезды, то яркие линии хромосферы, наложенные на фон непрерывного спектра фотосферы, стали бы заметными на фоне непрерывного спектра. Действительно, в этом случае Солнце и хромосфера его слились бы для нашего глаза в одну светящуюся точку, и мы при помощи спектроскопа наблюдали бы суммарный спектр Солнца, образованный наложением друг на друга спектров всех его отдельных частей. Этим объясняется происхождение узких ярких линий в спектрах горячих звезд.

в) Яркие полосы¹. Происхождение широких ярких полос объясняется тем, что атомы, составляющие обширную разреженную атмосферу некоторых звезд, находятся в непрерывном радиальном движении, причиной которого, вероятно, является давление света, исходящее с поверхности звездной фотосферы. Световое давление в наиболее горячих звездах способно не только поддерживать атомы атмосферы на огромной высоте над поверхностью звезды, но и сообщать им ускорение, направленное кнаружи. В результате этого многие атомы звездной атмосферы приобретают ускорение кнаружи большее, чем ускорение внутрь под действием тяготения к звезде, и улетают в межзвездное пространство, а на смену им давление света выбрасывает с поверхности звезды все новые и новые атомы. Таким образом, атмосфера звезды с яркими полосами в спектре представляет собой как бы дождь атомов, направленный с поверхности звезды наружу во все стороны и постепенно рассасывающийся в пространстве.

Если размеры атмосферы велики в сравнении с размерами самой звезды и атмосфера достаточно прозрачна, то нас будет достигать свет, излучаемый не только приближающимися, но и почти всеми удаляющимися от нас атомами. Удаляющиеся атомы будут вызывать яркие спектральные линии, смещенные максимально к красному концу спектра, тогда как атомы, движущиеся прямо к наблюдателю, будут давать линии, наиболее смещенные к фиолетовому концу спектра. Сливаясь вместе, яркие линии, излучаемые

¹ Здесь идет речь о широких ярких полосах, какими в некоторых горячих звездах представляются те линии *атомных* спектров, которые в спектрах обычных звезд выглядят как нормальные узкие линии. Эти полосы не надо смешивать с полосами *молекулярных* спектров, которые в спектрах звезд наблюдаются только как темные и яркими никогда не бывают.

атомами, движущимися по разным направлениям, образуют в совокупности широкую яркую полосу, половина ширины которой, очевидно, соответствует максимальной скорости атомов, выбрасываемых с поверхности звезды. В звездах типа Вольфа — Райе эта скорость достигает 2000 км/сек. Подсчеты показывают, что масса вещества при таком выбрасывании атомов с поверхности звезды теряется звездой лишь чрезвычайно медленно, примерно порядка 10^{-5} от массы звезды в год, и, вероятно, такая потеря продолжается сравнительно недолгое время. Она может прекратиться при уменьшении температуры звезды или вследствие других причин, так что звезде не угрожает опасность целиком рассеяться в межзвездном пространстве.

В недавние годы обнаружен ряд звезд, например γ Кассиопеи и другие звезды, также принадлежащие к спектральному классу В или О, у которых яркие линии то появляются, то исчезают. Очевидно, в атмосферах этих звезд происходят какие-то изменения, которые то благоприятствуют выбрасыванию атомов с поверхности звезды, то не благоприятствуют.

§ 164. Физическая интерпретация спектральной классификации. Спектральная классификация основана, как мы знаем, на оценке интенсивности линий поглощения. Например, класс М мы характеризуем тем, что в нем линия $\text{Ca } \lambda 4227$ имеет наибольшую интенсивность, а дублет Ca^+ , состоящий из фраунгоферовых линий Н и К, слабый. Звезды класса G мы характеризуем тем, что в них линия $\lambda 4227$ слабее, а линии Н и К достигают максимальной интенсивности. Класс В8 мы характеризуем, в частности, тем, что в нем линии $\lambda 4227$ исчезают совсем, а класс О, в частности, тем, что в нем нет линий Н и К. При одинаковых вероятностях внутриатомных переходов, вызывающих данные спектральные линии, отношение интенсивностей линий ионизированных и нейтральных атомов пропорционально отношению чисел этих атомов. Последнее отношение дается формулами ионизации, выражающими его как функцию температуры. Если вычислить по формулам ионизации процент атомов Ca , Ca^+ и Ca^{++} при различных температурах, но при одинаковом давлении, как это приблизительно должно иметь место в звездных атмосферах, то мы увидим полное соответствие с наблюдаемой картиной и с температурами звезд, найденными различными методами.

В наиболее холодных звездах класса М почти весь кальций находится в нейтральном состоянии. В звездах класса G0 (при температуре около 5500°) наибольшее число атомов находится в

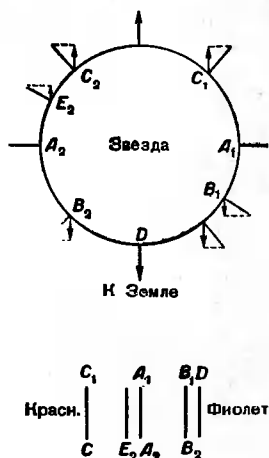


Рис. 197. Объяснение происхождения ярких полос в спектрах звезд типа Вольфа — Райе

состоянии Ca^+ , а в еще более горячих звездах атомы кальция переходят в дважды ионизированное состояние, и потому линии Ca , а затем и линии Ca^+ ослабляются все больше и больше. В очень горячих звездах весь кальций дважды ионизирован. Его линии отсутствуют в доступной наблюдениям области спектра, хотя кальций может быть представлен в атмосфере горячей звезды в том же количестве, что и в холодных звездах. Более подробный анализ подтверждает это в отношении остальных элементов, показывая, кроме того, что в общем по мере перехода к более горячим звездам линии нейтральных атомов исчезают прежде всего у элементов с наименьшим потенциалом ионизации. Таким образом, *основной причиной различия звездных спектров является не различие химического состава, а различие степени ионизации атмосфер, которое вызвано главным образом различием температур.*

§ 165. Понятие температуры звезды. Когда говорят о температуре звезды, то подразумевают, вообще говоря, температуру наружных поверхностных слоев звезды. Только эту температуру и можно непосредственно определить при помощи астрофизических наблюдений, в то время как значительно более высокая температура глубоких внутренних слоев звезд недоступна нашим непосредственным измерениям и может быть вычислена лишь теоретически, исходя из тех или иных предположений о строении звезды. Самая высокая температура, получаемая устойчивым образом в физической лаборатории — в пламени электрической дуги, — составляет около 3500° .

Между тем поверхностные температуры звезд, измеряемые тысячами, а иногда десятками тысяч градусов, предоставляют нам непрерывную возможность изучать строение их вещества. Таким образом, астрофизическое изучение состояния газов при этих температурах является ценным дополнением к тем исследованиям, которые физики производят при высоких температурах в лаборатории. Несомненно, что целого ряда выводов о строении вещества, о строении атомов мы не смогли бы получить, если бы мы не располагали сведениями о поведении вещества при высоких температурах, которые нам доставляют данные астрофизики.

Однако температура атмосферы звезды — понятие не вполне определенное, потому что в действительности излучение звезды, доходящее до нас, представляет собой совокупность излучений, испускаемых наружными слоями звезды, находящимися на различных расстояниях от центра. Таким образом, наблюдаемое нами излучение звезды представляет некоторый суммарный эффект излучения ее наружных слоев. Если допустить, что звезды излучают, подобно абсолютно черному телу (по-видимому, это предположение довольно близко к истине), то при определении звездных температур оперируют с понятием эффективной температуры звезды.

Под *эффективной температурой* звезды понимают температуру абсолютно черного тела таких же размеров, как и звезда,

испускающего энергию, которая одинакова с фактическим излучением звезды.

§ 166. Методы определения температур звезд. Температуры звезд можно определить следующими методами:

1. По полному излучению — при помощи радиометра или термоэлемента, применяя закон Стефана — Больцмана. Этот метод требует знания «видимого» углового диаметра звезды.

2. По распределению энергии в спектре — при помощи какого-либо спектрофотометрического метода: визуального, фотографического, радиометрического или спектроболометрического, применяя формулу Планка.

3. По отношению энергий, излучаемых в двух участках спектра — выводя его из какой-либо системы показателей цвета и тому подобных характеристик, применяя закон Планка.

4. По теории ионизации звездных атмосфер — определяя, какие линии поглощения имеют максимум интенсивности в данном спектре.

5. По теории свечения газовых туманностей — определяя интенсивности линий излучения в спектре газовой туманности, если таковая окружает данную звезду (способ, применяемый лишь к самым горячим звездам).

Так как в спектре звезды присутствуют темные линии, а в холодных звездах даже полосы поглощения, то они, накладываясь на непрерывный спектр звезды, искажают распределение энергии в нем. Поэтому различные методы определения температур не могут дать в точности одинаковых результатов. К этому следует добавить, что температура, определяемая по теории ионизации, дает температуру обращющего слоя звезды. Температура же обращющего слоя у звезды, как и у Солнца, немного ниже, чем температура фотосферы. Ввиду всего этого под *эффективной температурой* понимают обычно результаты, получаемые только по первым трем из перечисленных методов.

§ 167. Определение температур звезд:

1. По полному излучению. Сущность способа состоит в том, что при помощи радиометра или термоэлемента измеряется полная энергия, падающая на измерительный прибор и излученная звездой. Из таких измерений нетрудно подсчитать, каково количество энергии, падающее за 1 мин. на 1 см² земной поверхности, перпендикулярной к лучам звезды.

Получаемая величина во всем аналогична солнечной постоянной, и ясно, что для вычисления звездной температуры по этим данным необходимо знать линейный диаметр звезды и расстояние до нее. Тогда мы тем же путем, как и в отношении Солнца, можем вычислить, какое количество энергии звезда излучает с 1 см² поверхности, т. е. величину E в формуле Стефана — Больцмана:

$$E = \sigma T^4.$$

Отсюда мы находим T .

Наблюдаемое нами излучение звезды должно быть исправлено за поглощение в земной атмосфере.

2. По распределению энергии в спектре. Этот способ определения звездных температур доставляет нам наиболее подробные сведения о характере звездного излучения. Спектроболометрические измерения наиболее ярких звезд показали, что в общих чертах распределение энергии по всему спектру звезд приблизительно соответствует излучению абсолютно черного тела определенной температуры. Для того чтобы определить величину

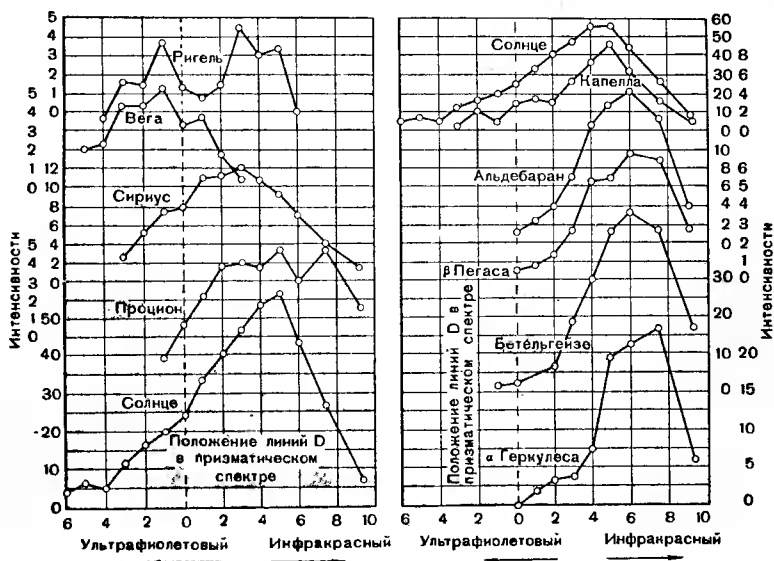


Рис. 198. Кривые распределения энергии в спектрах звезд, полученные при помощи спектроболометра

самой температуры, нужно сравнить наблюдаемую кривую распределения энергии с кривыми, вычисленными по формуле Планка для абсолютно черного тела при разных температурах.

Для большинства звезд, не обладающих достаточным блеском, этот способ, к сожалению, неприменим, и поэтому приходится прибегать к исследованию распределения энергии в более ограниченных участках спектра, доступных для исследований визуальных или фотографических. Из сравнения полученных кривых распределения энергии мы видим, что спектр более горячей белой звезды гораздо богаче синими и фиолетовыми лучами, чем спектр холодной звезды. (Заметим, что на рисунке 198 шкала длин волн по оси абсцисс произвольна и на ней отмечено для ориентировки прерывистой прямой положение желтой линии натрия D.) На рисунке отчет-

ливо видно также, как с повышением температуры звезды положение максимума энергии в ее спектре в соответствии с законом Вина смещается в сторону ультрафиолетового конца спектра (чем ниже на диаграмме кривая, тем более холодной звездой она соответствует).

3. По отношению энергий, излучаемых в двух участках спектра. Настоящий способ является как бы упрощенным видоизменением предыдущего способа. Основываясь на формуле Планка, можно показать, что отношение интенсивностей двух участков спектра является однозначной функцией температуры звезды. Точность настоящего метода невелика, но им пользуются потому, что для слабых звезд сравнительно легко получить их показатель цвета.

4. По теории ионизации звездных атмосфер. Формула ионизации связывает температуру звезды, давление в ее обрабатываемом слое и долю атомов данного элемента, находящихся в ионизированном состоянии. Последняя определяется по отношению интенсивностей линий поглощения нейтральных и ионизированных атомов.

Электронное давление P в обрабатываемом слое звезд можно оценить из различных соображений, и оно сравнительно мало влияет на температуру при прочих равных условиях.

§ 168. Болометрическая звездная величина. В теоретических расчетах большую роль играет понятие болометрической звездной величины, характеризующей полное излучение звезды, т. е. ее суммарное излучение во всех длинах волн. Если звезду принять за абсолютно черное тело, то болометрическая величина может быть вычислена по любой другой (например, визуальной или фотографической) при помощи так называемых болометрических поправок.

Болометрической поправкой называется величина, которую надо придать к данной звездной величине, чтобы получить болометрическую звездную величину звезды. Болометрическая поправка является функцией температуры. Если T означает абсолютную температуру звезды, ΔM — соответствующую ей болометрическую поправку, то для визуальных звездных величин $M_{\text{виз}}$ имеем:

$$\Delta M = M_{\text{бол}} - M_{\text{виз}} = -\frac{29\,500}{T} - 10 \lg T + 42,53.$$

§ 169. Результаты измерений звездных температур. Температуры звезд, как они получаются в среднем для различных спектральных классов, были приведены в таблице 19 на странице 342. Температуры эти приведены округленными, чтобы их легче было запомнить.

Из таблицы видно, что температуры звезд-карликов на несколько сотен градусов выше, чем температуры звезд-гигантов того же самого спектрального класса. Характер спектра поглощения, по которому мы классифицируем звезды, определяется степенью иони-

зации звездной атмосферы, но в звездах-карликах, где плотность довольно большая, такая же степень ионизации, как у разреженных звезд-гигантов, достигается при более высокой температуре. Самыми холодными из звезд являются звезды спектрального класса N. Их температура составляет около 2000° . Самыми горячими являются звезды класса O с температурой порядка $30\,000^{\circ}$. Отдельные, крайне немногочисленные звезды, именно те, которые имеют спектры типа Вольфа—Райе или являются ядрами так называемых планетарных туманностей (см. § 201), имеют температуру, доходящую до $140\,000^{\circ}$. Звезды класса G, т. е. звезды того же спектрального класса, что и наше Солнце, имеют температуру того же порядка, что и Солнце (около 6030°). У звезд класса A по причине особого состояния их атмосферы распределение энергии в спектре оказалось не соответствующим их истинной температуре $10\,000^{\circ}$, а таким, как если бы их температура была $16\,000^{\circ}$, и это показывает всю важность определения звездных температур разными методами.

§ 170. Количественный химический анализ атмосфер звезд и Солнца. От установления того, какие химические элементы встречаются в атмосферах звезд, удалось перейти и к установлению относительных количеств этих элементов, т. е. к количественному химическому анализу. В основу последнего положено, что при прочих равных условиях наиболее темными, т. е. интенсивными, будут линии тех химических элементов, атомов которых в атмосфере звезды всего больше, так что свет фотосферы, встречающий эти атомы, больше всего ими поглощается. Надо, однако, учесть, что количество энергии, поглощаемое атомами данного элемента в разных линиях его спектра, различно. К сожалению, эти величины в физике для большинства атомов известны лишь приближенно. Во-вторых, надо учесть, что часть атомов находится в нейтральном, а часть в ионизированном состоянии. Полное число атомов данного элемента равно сумме тех и других. Теория ионизации позволяет учесть их пропорцию, если температура газа известна. Измеряя интенсивности темных линий в спектре Солнца, можно установить приблизительное число атомов, находящихся над каждым квадратным сантиметром фотосферы.

Попытка определения относительного количества разных атомов в атмосферах звезд исходила из мысли о том, что при прочих равных условиях возбуждения линии атомов, находящихся в большом числе, будут раньше появляться и позднее исчезать в спектральной последовательности звезд, чем линии атомов, находящихся в меньшем изобилии. Относительные числа атомов N в атмосферах звезд даны в таблице 20 в логарифмах по сравнению с таковыми для Солнца. Количество гелия на Солнце не приведено, потому что оно определяется в этом случае неточно.

Если учесть, что для некоторых элементов по ряду причин исследование просто не удавалось провести, то мы можем заключить о сходстве количественного химического состава атмосфер звезд и земной коры. В звездах и Солнце львиная доля атомов принад-

Относительное содержание элементов в атмосферах звезд и Солнца

Элемент	Звезды	Солнце	Элемент	Звезды	Солнце	Элемент	Звезды	Солнце
H	11,4	11,5	Al	6,9	6,4	Mn	6,5	5,9
He	—	10,2	Si	7,5	7,3	Fe	6,7	7,2
Li	1,9	2,0	K	5,3	6,8	Zn	6,1	4,9
C	6,4	7,4	Ca	6,7	6,7	Sr	3,5	3,3
O	8,0	9,0	Ti	6,0	5,2	Ba	3,0	3,3
Na	7,1	7,2	V	4,9	5,0			
Mg	7,5	7,8	Cr	5,8	5,7			

лежит водороду. Около тысячной того же количества приходится на долю гелия. Число атомов остальных элементов в сравнении с водородом ничтожно мало. Встречаются звезды с особенно большим содержанием азота, углерода или циркония. В работах акад. Г. А. Шайна в некоторых звездах обнаружено крайнее изобилие тяжелого изотопа углерода C_{13} .

§ 171. Методы определения диаметров звезд. Как мы знаем, в телескоп видны ложные дифракционные диски звезд, вызванные дифракцией света от краев объектива. Реальные диски звезд в современные телескопы не видны. Легко, например, рассчитать, что для того чтобы одна из ближайших к нам звезд α Центавра имела заметный диск в наибольший из наших современных телескопов с разрешающей силой порядка $0'',05$, ее линейный диаметр должен был бы превышать диаметр Солнца в 30 раз. Тем не менее мы обладаем тремя возможностями определить диаметры звезд:

1) *путем вычисления по температуре звезды и ее абсолютной звездной величине;*

2) *путем измерения при помощи интерферометра;*

3) *путем вычисления для затменно-двойных звезд (алголей).*

Первый способ применим ко всем звездам, температуры, расстояния в видимые величины которых известны, т. е. применим к большому числу звезд, тем более, что знание спектрального класса звезды уже дает нам приближенную оценку ее температуры. При помощи интерферометра измерены диаметры всего лишь немногим больше десятка звезд-сверхгигантов, и в общем эти измерения полностью подтвердили результаты вычислений. Для нескольких звезд, принадлежащих к типу алголей, или затменно-двойных, диаметры могут быть вычислены, если известны кривая изменения блеска этих звезд и кривая их лучевых скоростей.

Возможность вычислять диаметры звезд открылась после того, как впервые были измерены их температуры, т. е. примерно с 1920 г., а первое измерение диаметра звезды при помощи интерферометра, которое до некоторой степени можно считать непосредственным измерением диаметра, было осуществлено тоже в 1920 г. и составило эпоху в астрофизике.

§ 172. Вычисление диаметров звезд с известной температурой. Относительный линейный диаметр звезд, имеющих температуру T , которой, согласно закону Стефана — Больцмана, определяется их болометрическая поверхностная яркость E , находится из очевидной пропорции:

$$\frac{D_1^2}{D_2^2} = \frac{L_1}{L_2} \frac{T_2^4}{T_1^4}; \quad \frac{L_1}{L_2} = \frac{D_1^2 \cdot T_1^4}{D_2^2 \cdot T_2^4}, \quad (1)$$

где L_1 и L_2 — их болометрические светимости, так как $L = \pi D^2 \sigma T^4$.

Если принять звезды за абсолютно черные тела, то формулу (1) легко преобразовать и для визуальной или иной светимости звезды, которую всегда можно связать с болометрической или непосредственно с температурой.

Если пользоваться абсолютной болометрической светимостью звезд L , то для двух звезд одинаковой температуры мы можем написать:

$$D_1 : D_2 = \sqrt{L_1 : L_2}.$$

§ 173. Определение диаметров звезд при помощи интерферометра. Идея звездного интерферометра состоит в следующем. Теория и опыт, как известно, показывают, что изображение бесконечно удаленной светящейся точки в телескопе получается в виде дифракционного диска, окруженного дифракционными кольцами. Такими же представляются в телескоп и звезды.

Представим себе, что объектив телескопа закрыт непрозрачным экраном с двумя узкими параллельными щелями. Щели можно устанавливать на любом расстоянии одну от другой. Если теперь направить телескоп на светящуюся точку, то в фокусе телескопа вместо диска с кольцами вследствие возникающих при этом явлений интерференции виден светлый диск, пересекаемый рядом тонких темных полос. Полосы интерференции возникают оттого, что изображение точки в фокусе получается при прохождении света сквозь две щели и в разных точках диска приходящие туда лучи света имеют разность хода, достигающую для определенных точек этого диска нечетного числа полуволн.

Если на небе есть две звезды, находящиеся одна от другой на малом угловом расстоянии, сравнимом с диаметром дифракционного диска звезды, то раздельно эти две звезды в телескоп не могут быть видны, так как их дифракционные диски частично накладываются один на другой. Если объектив телескопа закрыт диафрагмой со щелями, то каждый диск превращается в систему интерференционных полос. Если промежуток между светлыми и темными полосами (зависящий от расстояния между щелями) равен расстоянию между центрами дифракционных звездных дисков, как они получаются в фокусе телескопа, то светлые полосы одной системы накладываются на темные полосы другой системы и полосатость изображения исчезает. Зная зависимость расстояния между светлыми и темными полосами как функцию длины волны падающего света и зная расстояние между щелями диафрагмы, при котором полосатость исчезает, можно вычислить угловое расстояние между светящимися точками. Легко понять, что если при вращении диафрагмы линия, соединяющая щели, станет параллельной линии, соединяющей звезды на небе, то при указанных выше условиях полосы интерференции будут исчезать, но будут появляться, когда эти две линии будут взаимно перпендикулярны.

Если источником света является диск очень маленьких угловых размеров, то его можно рассматривать как компоненты тесной двойной звезды.

Тогда при определенном раздвижении щелей полосатость будет исчезать уже при любом угловом положении линии, соединяющей щели диафрагмы. Это позволяет отличить случай измеримого углового диаметра звезды от случая тесной двойной звезды.

Оказалось, что даже для измерения наиболее гигантских красных звезд при помощи $2\frac{1}{2}$ -метрового телескопа щели диафрагмы, помещенной перед зеркалом, пришлось бы развернуть дальше, чем это позволяют размеры зеркала. Поэтому, для того чтобы добиться цели, астрономы установили на верхнем конце телескопа стальную ферму, перпендикулярную к оптической оси телескопа. По этой ферме движутся два зеркала, заменяющие собой щели.

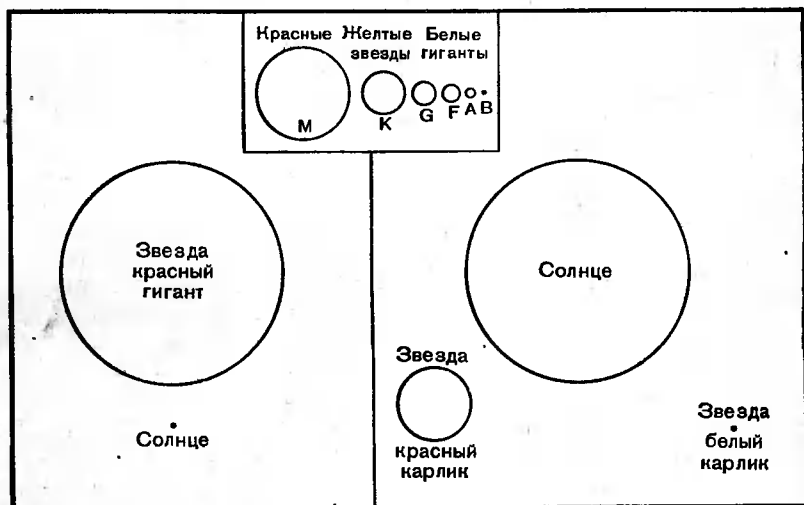


Рис. 199. Сравнительные размеры типичных звезд

Лучи от этих зеркал при помощи двух вспомогательных зеркал, находящихся на той же ферме ближе к оси телескопа, отражаются на главное зеркало телескопа и сходятся, как обычно, в фокусе. В результате присоединения фермы диаметр зеркала телескопа был как бы увеличен до 6 м. Однако даже подобным прибором удалось измерить диаметры всего лишь десятка звезд.

§ 174. Результаты измерений диаметров звезд. В таблице 21 (стр. 362) приведены диаметры типичных звезд.

Наиболее огромными являются холодные красные сверхгиганты, потом следуют красные гиганты, потом желтые гиганты, потом белые горячие звезды, потом желтые звезды-карлики, подобные нашему Солнцу, и, наконец, самыми маленькими из обычных звезд являются красные звезды-карлики. Еще меньшими оказываются, известные пока в небольшом числе, так называемые белые карлики, как, например, спутник Сириуса.

Самой маленькой из известных звезд является белый карлик — звезда Кайпера, диаметр которой вдвое меньше диаметра Земли. Обычно же звезды-карлики лишь немногим уступают по своим размерам нашему Солнцу. Они меньше его лишь в два-три раза

и во всяком случае значительно больше Земли. Чудовищными по своим размерам являются красные сверхгиганты спектрального класса М, которые превосходят наше Солнце по диаметру в сотни раз. Звезды: Бетельгейзе в 460, а VV Цефея в 1000 с лишним раз больше нашего Солнца по диаметру, так что внутри Бетельгейзе может уместиться Солнце с орбитами всех планет до Марса включительно. Как мы увидим в следующем параграфе, чем больше диаметр звезды, тем в общем меньше ее средняя плотность, так что гигантские по размерам звезды являются крайне разреженными (рис. 199).

§ 175. Белые карлики. Наблюдения спутника Сириуса показали, что эта звезда во многих отношениях чрезвычайно любопытна; в течение десятилетий она казалась даже исключительной. Спутник Сириуса слабее главной звезды в 4000 раз. Между тем спектр спутника, как выяснилось, чрезвычайно похож на спектр главной звезды, и поэтому явилось предположение, что спутник Сириуса светит отраженным светом. Однако если допустить, что спутник Сириуса отражает целиком падающий на него свет главной звезды, то даже в этом случае для спутника приходится принимать невероятно большие размеры. Он получается по размерам во много раз больше, чем главная звезда. Соотношение это получается настолько нелепым, что допустить, что спутник Сириуса в действительности темный и светит отраженным светом, просто невозможно. С другой стороны, так как двойная система Сириуса хорошо исследована, то точно известно значение массы спутника, которая оказывается лишь немногим меньше массы Солнца (0,97). Если допустить, что спутник Сириуса излучает свой собственный свет, то мы приходим к заключению, что размер спутника должен быть очень невелик. Он должен быть в 30 раз меньше Солнца по диаметру или всего в 3 с лишним раза больше диаметра Земли. Но если мы вычислим тогда среднюю плотность спутника, т. е. разделим его массу на его объем, то мы получим для спутника Сириуса невероятно большую плотность, именно плотность около 40000 г/см^3 . Когда подобные подсчеты впервые были произведены (в 1914 г.), то астрономы стали в тупик.

Успехи теоретической физики, выяснившей строение атома в 20-х годах текущего столетия, показали, однако, что такая исключительно высокая плотность звезд является возможной. Действительно, атомы являются сложными системами; по современным представлениям атомы состоят из крохотных ядер, окруженных электронами, вращающимися вокруг них по орбитам. За размеры атома принимается размер орбиты самого внешнего электрона. Определяемые таким образом размеры атомов ставят предел их взаимному сближению.

В недрах звезд господствуют столь высокие температуры, что подавляющее большинство атомов должно быть там полностью ионизировано. От атомов остаются одни только ядра с ближайшими к ним электронами. Размеры таких атомов значительно меньше,

и они действием давления могут быть сближены друг с другом гораздо теснее.

Таким образом, теоретическая физика дает нам возможность объяснить высокую плотность спутника Сириуса и указывает причину, почему подобные плотности не встречаются на Земле, где невозможно достигнуть таких высоких температур и давлений, какие господствуют в звездах.

Крайне интересное подтверждение высокой плотности спутника Сириуса было получено в 1919 г., исходя из общей теории относительности Эйнштейна. Согласно теории относительности, колебания в атомных системах, обуславливающие излучение атомной энергии, происходят замедленно в очень сильном поле тяготения. На поверхности спутника Сириуса, как легко рассчитать, зная его радиус и массу, сила тяжести больше, чем на Земле, примерно в 30 000 раз. Теория относительности позволяет рассчитать, что атомы, находящиеся на поверхности спутника Сириуса, в его атмосфере должны излучать колебания с частотой, настолько уменьшенной, что длина волн линий в спектре этой звезды должна измениться на величину, соответствующую скорости удаления от нас, равной 17 км/сек. Иными словами, если спутник Сириуса действительно такой необычайно плотный, то линии его спектра должны были бы быть смещены к красному концу спектра на величину, соответствующую скорости удаления от нас, по принципу Доплера — Физо, равной 17 км/сек. Обусловленное большой силой тяжести смещение линий к красному концу спектра, вытекающее из теории относительности, называется «красным смещением».

Для одиночной звезды, находящейся в пространстве, установить, существует ли у нее красное смещение, невозможно. Иначе обстоит дело, к счастью, в случае спутника Сириуса; орбита спутника прекрасно изучена и известно движение центра тяжести двойной системы по отношению к Солнцу, и можно для любого момента вычислить, какую скорость в проекции на луч зрения должен иметь спутник Сириуса. Измерение спектрограмм показало, что с точностью до ± 2 км/сек линии в спектре спутника Сириуса сдвинуты к красному концу на величину, соответствующую скорости удаления 19 км/сек, т. е. почти совпадающую с предсказаниями теории относительности. Таким образом, исходя из теории относительности, красное смещение в спектре спутника Сириуса можно рассматривать как подтверждение чудовищно высокой плотности спутника Сириуса. Если же мы будем основываться на астрономических выводах, то оно же может быть рассматриваемо как астрофизическая проверка справедливости теории относительности.

Звезды, подобные спутнику Сириуса, весьма горячие и имеющие белый цвет при сравнительно очень малых размерах поверхности, получили название *белых карликов* в отличие от рядовых красных карликов. Исследования последних лет показали, что белые карлики не являются какими-либо исключениями в природе. К 1953 г. в ближайших окрестностях Солнца было открыто уже около сотни

белых карликов. На больших расстояниях от Солнца открытие белых карликов затруднительно вследствие того, что эти звезды обладают весьма малой светимостью. Наиболее замечательным из известных белых карликов является звезда Кайпера, хотя данные о ней значительно менее точны, чем для спутника Сириуса, потому что она — одиночная звезда. Согласно предварительному расчету, ее диаметр вдвое меньше Земли, средняя плотность составляет $2,4 \cdot 10^6$, т. е. в 100 000 раз больше плотности платины.

Если бы можно было наполнить веществом спутника Сириуса спичечную коробку, то, будучи положена на одну чашку весов, она уравнивала бы 15 взрослых человек, помещенных на другую чашку. Чтобы уравновесить ту же коробку, наполненную веществом из недр звезды Кайпера, пришлось бы на другую чашку весов поставить уже не 15 человек, а груженный до отказа 50-тонный товарный вагон. Масса белых карликов не укладывается на кривую зависимости «масса — светимость». Для большинства открытых к настоящему времени белых карликов плотности вычислены не особенно точно, потому что эти звезды не являются компонентами двойных систем и их массы могут быть оценены лишь предположительно.

§ 176. Массы и плотности звезд. Массы звезд возможно определить точно лишь для визуально-двойных звезд на основании изучения их орбит. Таких определений сделано около сотни. Потребность получить более богатые данные о звездных массах заставляет прибегать к менее точным способам определения масс, которые все в той или иной мере являются статистическими, т. е. дают значения масс для определенных типов звезд в среднем. Не останавливаясь на описании этих способов, укажем лишь, что по своим массам звезды отличаются от Солнца не так сильно, как по своим диаметрам и светимости. В то время как светимости звезд относятся к светимости Солнца в пределах примерно от 50 000 до 0,00002, а диаметры — примерно в пределах от 1000 до 0,01, массы звезд в среднем колеблются всего лишь от 10 до $\frac{1}{4}$ массы Солнца. В некоторых исключительных случаях (для некоторых спектрально-двойных звезд) несомненно существование масс порядка сотни масс Солнца.

Статистическое сопоставление масс и светимостей звезд приводит к замечательно интересному и практически важному результату: чем больше масса звезды, тем больше ее светимость. Эта зависимость представлена на рисунке 200. Кривая «масса — светимость», установленная эмпирически, позволяет по абсолютной величине звезды, характеризующей ее светимость, оценить и массу во всех тех случаях, когда масса звезды непосредственно не поддается определению.

Плотность звезды находится, вообще говоря, как масса, деленная на объем. Естественно, что в этом случае мы имеем в виду среднюю плотность звезд. Действительная же плотность звезды очень мала у ее поверхности (в атмосфере) и может достигнуть

огромных значений в центре звезды. Распределение плотностей как функции расстояния от центра, так же как и распределение температур, может быть вычислено лишь теоретически, исходя из некоторых предположений. Тем не менее значение средних плотностей также представляет для нас большой интерес, так как оно до некоторой степени все же характеризует физическое состояние звезд. Для определения средней плотности звезды нужно определить ее массу и диаметр. Результат подсчетов показывает в соответствии с данными предыдущих параграфов, что плотность звезд меняется в колоссальных пределах. Тогда как средняя плотность

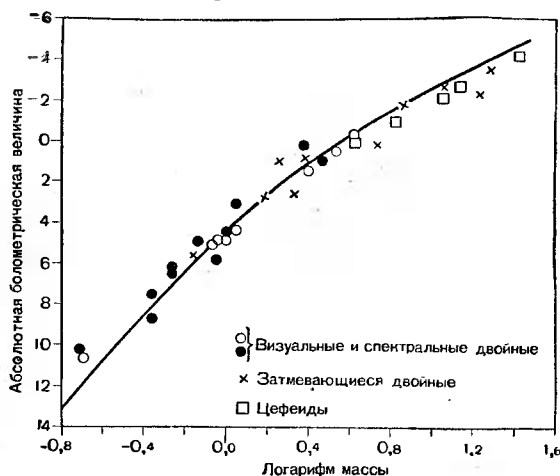


Рис. 200. Кривая «масса — светимость»

нашего Солнца составляет 1,4, средняя плотность красных карликов составляет около 5, а средняя плотность красных сверхгигантов, таких, как Антарес и Бетельгейзе, около 10^{-5} г/см³. Таким образом, средняя плотность этих гигантских холодных разреженных звезд в сотни раз меньше плотности комнатного воздуха. С другой стороны, плотности белых карликов в среднем исчисляются десятками и сотнями килограммов на 1 см³.

§ 177. **Диаграмма «спектр — светимость».** Чрезвычайно большой интерес представляет сопоставление светимости звезд с их спектральными классами (или температурами и цветом). Подобное сопоставление впервые было сделано в 1913 г. Расселлом, отчего диаграмма подобного вида часто называется диаграммой Расселла. Такая диаграмма представлена на рисунке 201, на котором по оси абсцисс отложены в их последовательности спектральные классы и соответствующие им температуры и цвета звезд, а по оси ординат отложены абсолютные величины звезд. В общих чертах звезды на диаграмме расположены не хаотически, а группируются в определенных местах, как это в верхней части диаграммы

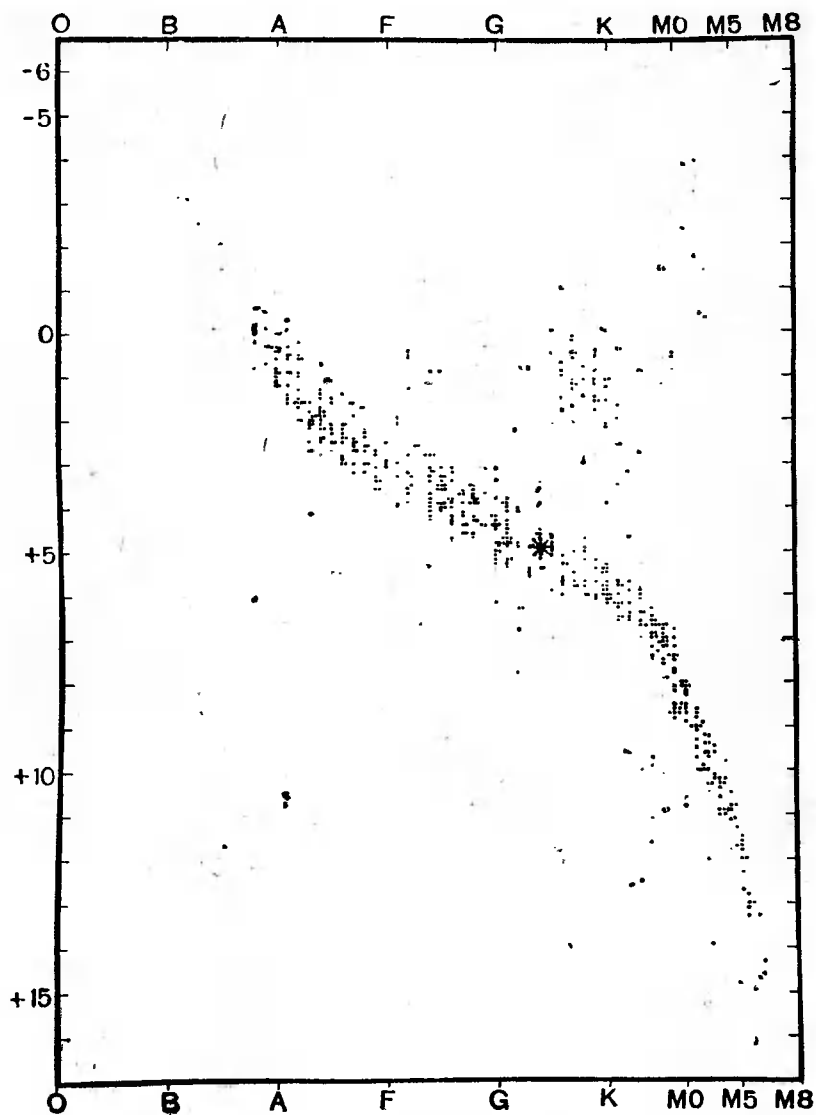


Рис. 201. Диаграмма «спектр—светимость»
для ближайших звезд.

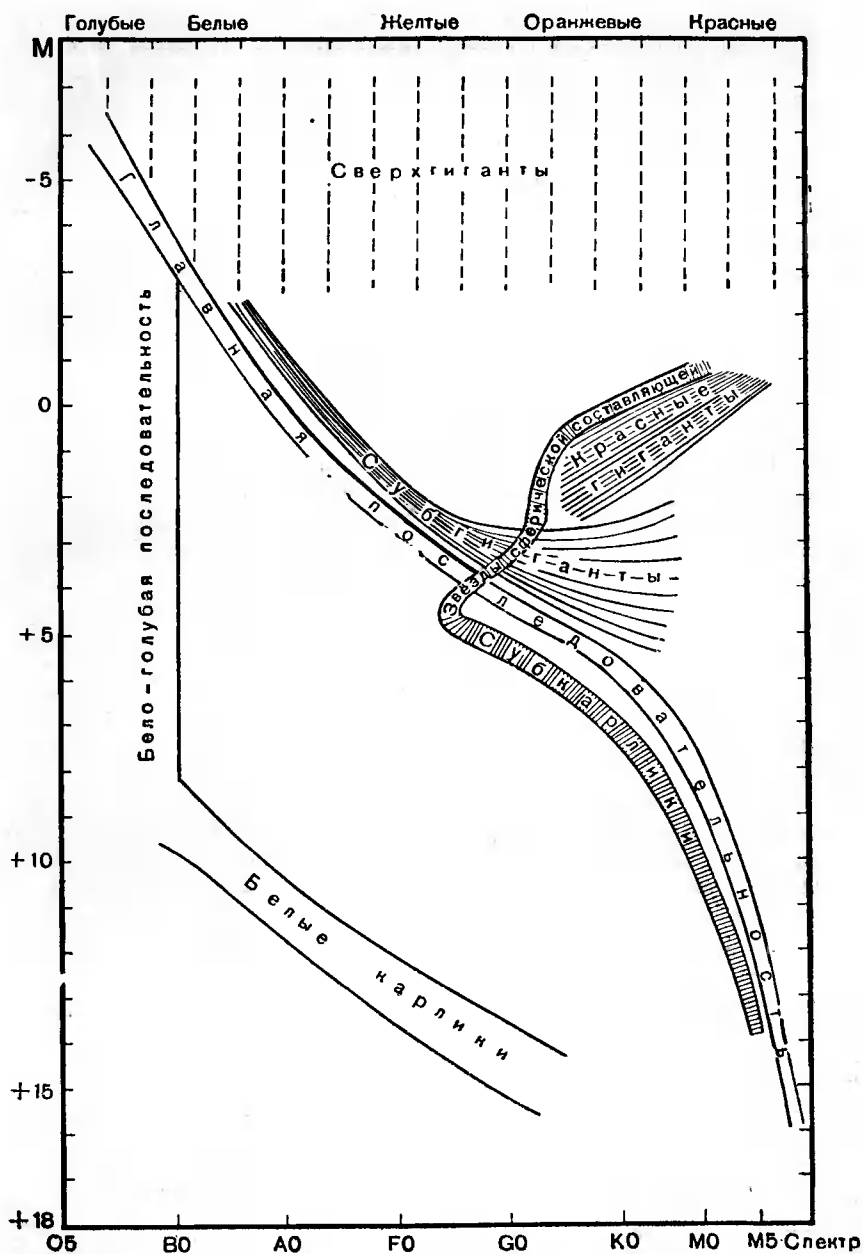


Рис. 202. Схематическое изображение последовательностей на диаграмме «спектр — светимость» (по П. П. Паренго)

изображено схематически на рисунке 202. Звезды, расположенные выше всего, называются *звездами-гигантами*, а лежащие заметно выше этой линии, — *сверхгигантами*. Звезды, расположенные вдоль наклонной линии, называются звездами главной последовательности или основной ветви, причем звезды, относящиеся к нижней половине этой линии, представляют собой *звезды-карлики*. На этой диаграмме отмечено положение нашего Солнца, рассматриваемого как звезда (спектральный класс G, абсолютная величина около +5). Особое место на диаграмме занимают так называемые *белые карлики*, находящиеся в левом нижнем углу диаграммы. Это, как мы видим по их положению на диаграмме, белые горячие звезды с малой светимостью.

На диаграмме «спектр — светимость» советскими астрономами обнаружено существование еще двух важных последовательностей звездных характеристик. Параллельно главной последовательности, немного ниже нее, расположены звезды, образующие так называемую последовательность *субкарликов*. Все они несколько слабее, чем звезды того же спектрального класса, но принадлежащие к главной последовательности. Последовательность субкарликов обнаружил П. П. Паренато, и по его расчетам подобных звезд в нашей системе может быть даже больше, чем звезд главной последовательности, к которой, по-видимому, принадлежит и наше Солнце.

Очень важно, что распределение в пространстве звезд разных последовательностей различно и они должны иметь различное происхождение. Звезды главной последовательности входят в системы, имеющие сплюснутую форму, а звезды последовательности субкарликов входят в системы звезд, имеющих сферическую форму.

Другая важная последовательность на диаграмме «спектр — светимость» названа *бело-голубой последовательностью*, так как содержит наиболее горячие звезды белого и голубого цвета. Она была обнаружена Б. А. Воронцовым-Вельяминовым и идет на диаграмме вертикально, начинаясь со звезд типа O и кончаясь белыми и голубыми карликами. Очень интересно и важно, что на диаграмме пространство между двумя названными крайними типами звезд заполнено звездами неустойчивыми. Это — звезды типа Вольфа — Райе и «новые звезды». Массы тех и других с течением времени уменьшаются во много раз в результате интенсивного выбрасывания газов с их поверхности. Теперь белые карлики на диаграмме уже не занимают изолированного положения.

Диаграмма «спектр — светимость» крайне важна тем, что она показывает определенную связь между температурой звезд и их абсолютными величинами. Несмотря на то, что точки на диаграмме довольно рассеяны, подавляющее большинство их делится на две резко обособленные группы — гигантов и карликов. Можно было бы думать, что, например, могут существовать звезды любых сочетаний спектра и абсолютной величины: например, звезды класса B с абсолютной величиной от +2 до +6 или звезды класса M с аб-

солютной величиной $+4$; между тем оказывается, что в природе таких звезд или нет, или очень мало.

При рассмотрении диаграммы нужно помнить, что на диаграмму нанесены звезды, данные о которых нам известны, и поэтому диаграммой не отражается действительное распределение числа звезд по разным признакам. Если бы мы построили такую диаграмму для звезд, находящихся внутри некоторого объема пространства, то на этой диаграмме звезд-гигантов оказалось бы чрезвычайно мало, а звезд-карликов — очень много. Нельзя строить предположений о развитии звезд с течением времени, игнорируя данные диаграммы «спектр — светимость», так как эта диаграмма показывает нам связь основных физических характеристик звезд, реально существующих в природе.

§ 178. Типичные звезды (общий обзор). Факты, приведенные в предыдущих параграфах, показывают, сколь разнообразны физические характеристики звезд — их диаметры, температуры и светимости или их абсолютные величины. Массы обнаруживают меньше разнообразия. Диаграмма «спектр — светимость» и кривая «масса — светимость» показывают, что в природе существуют лишь определенные комбинации масс, светимостей и радиусов звезд. Очевидно, что лишь определенные комбинации этих величин делают звезды устойчивыми, т. е. при определенном соотношении этих величин звезда может существовать устойчивым образом, не претерпевая слишком быстрого и резкого изменения своей природы. Медленное и постепенное изменение природы звезд, их эволюция при этом, конечно, должны происходить, но об этом будет речь в главе XIV.

Если мы проследим ветвь гигантов на диаграмме «спектр — светимость» от холодных красных гигантов, а затем последовательно спустимся вниз по основной ветви к красным карликам, то мы сможем констатировать следующее: на ветви гигантов мы встречаем звезды с большими, почти одинаковыми массами и при этом постепенно переходим от чудовищно огромных, холодных и чрезвычайно разреженных звезд к звездам все более и более горячим, но все меньшим и меньшим по размерам. Достигнув наиболее горячих белых звезд спектральных классов В и О, мы встречаем затем на главной ветви все более и более холодные звезды. Радиусы звезд уменьшаются в этом же самом направлении, и в этом же направлении происходит заметное уменьшение масс звезд. Подобранные данные для ряда типичных представителей звездного мира — гигантов, обычных карликов и белых карликов — приведены в таблице 21. В этой таблице компоненты двойных звезд обозначены буквами А (главная звезда) и В (спутник). Для них даны точные значения масс, выведенные по элементам орбит. Для остальных звезд массы оценены по кривой «масса — светимость» и заключены в скобки. Средние плотности везде найдены делением массы на объем. За единицу светимости, радиуса, массы и плотности приняты соответствующие величины для Солнца. Диаметры большинства звезд вычислены по их температурам и параллаксам.

Типичные звезды

Звезды	Спектральный класс	Температура	Видимая величина	Видимый диаметр	Параллакс	Абсолютная величина	Светимость ¹	Радиус ¹	Масса ¹	Плотность ¹
Главный ряд										
Ориона	O9	28 000°	2 ^m ,9	0",0003	0",0051	-3 ^m ,6	2300	7	(27)	0,09
Спика	B2	20 000	1,2	0,0006	0,014	-2,3	730	5	(11)	0,1
Vega	A0	12 000	0,1	0,003	0,124	+0,6	50	2,2	(2,8)	0,2
Процион A	dF5	7 000	0,5	0,005	0,310	+2,9	5,8	1,8	1,2	0,2
α Центавра A	dG0	6 000	0,3	0,007	0,756	+4,7	1,1	1,0	1,1	1,0
ε Волопаса B	dK4	4 200	6,7	0,001	0,160	+7,7	0,07	0,65	0,58	2,0
Крыuger 60 A	dM3	3 000	9,3	0,001	0,255	+11,3	0,003	0,41	0,30	4,5
Гиганты										
Капелла B	gF5	6 500	1,2	0,004	0,063	+0,2	69	7	3,3	0,011
Капелла A	gG0	5 500	0,2	0,008	0,063	-0,3	111	12	4,2	0,0023
Арктур	gK0	4 200	0,2	0,019 ²	0,080	-0,2	109	26	(11)	0,0007
β Пегаса	gM2	3 000	2,6	0,021 ²	0,016	-1,4	310	141	(14)	0,000005
Сверхгиганты										
Ригель	cB8	13 000	0,3	0,002	0,0069	-5,5	13 000	33	(40)	0,001
Денеб	cA2	11 000	1,3	0,002	0,005	-5,2	10 000	35	(35)	0,0008
Канопус	cF0	8 000	-0,9	0,007	0,009	-6,1	24 000	85	(50)	0,00008
Антарес A	cM0	3 200	1,2	0,029 ²	0,0095	-3,9	3 100	328	(50)	0,000001
Белые карлики										
40 Эридана B	B9	12 500	9,7	0,00003	0,205	+11,3	0,003	0,016	0,31	79 000
Сириус B	A6	9 400	7,1	0,0001	0,379	+10,0	0,009	0,029 ³	0,89	37 000
Звезда ван-Маанена . .	F0	8 000	12,3	0,0002	0,250	+14,3	0,0002	0,007	(0,12)	300 000

¹ По сравнению с Солнцем. ² По измерениям с интерферометром. ³ По эффекту Эйнштейна.

В таблице нет субкарликов, которые отличаются от звезд главной последовательности лишь несколькими меньшими светимостями и меньшими диаметрами.

§ 179. Вращение звезд. Так как звезды представляются точками и дисков у них не видно, то непосредственно из наблюдений определить период вращения звезд, подобно тому, как мы определяем период вращения планет, невозможно. Лишь совсем недавно открылась возможность обнаружить и исследовать вращение звезд. Для этого существуют две возможности: во-первых, исследование затменно-двойных звезд (алголей), во-вторых, исследование контуров спектральных линий обыкновенных звезд.

Когда темная звезда в затменно-двойной системе закрыта собой более яркую, то изучаемый нами свет исходит практически от одного края затмившейся более яркой звезды. Если в такой момент наблюдения незакрытым остается приближающийся к нам вследствие вращения край звезды, то линии спектра должны смещаться к фиолетовому концу спектра. Через некоторое время, когда темная звезда передвинется перед более яркой и откроет другой край более яркой звезды, линии спектра должны смещаться к красному концу спектра. Говоря о смещении линий, мы в обоих случаях подразумевали смещение по отношению к такому их положению, которое они занимают вне затмения. Наблюдения над самым Алголем обнаружили как раз это явление.

Академик Г. А. Шайн (в СССР) и О. Л. Струве (в США) показали, что у вращающейся звезды линии спектра должны быть деформированы, расширены по сравнению с линиями спектра такой же самой звезды, которая не вращается (рис. 203).

Установлено, что быстрее всего вращаются горячие белые звезды спектральных классов О и В. Линейная скорость вращения на их экваторе составляет до 250 км/сек, в то время как скорость вращения нашего Солнца на экваторе составляет лишь 2 км/сек. Обнаружить скорость вращения звезд более поздних спектральных классов пока еще не удастся, потому что эти скорости невелики и вызываемые ими искажения контуров спектральных линий не могут быть обнаружены из наблюдений.

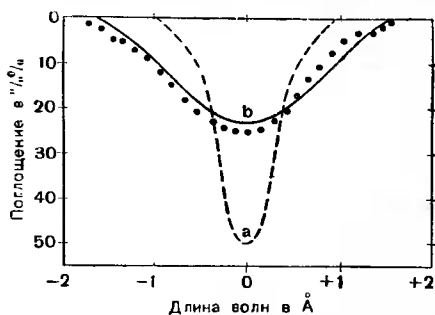


Рис. 203. Контуры спектральных линий в спектрах звезд
а — не вращающейся, б — вращающейся

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ДВОЙНЫЕ, ПЕРЕМЕННЫЕ И НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ. ДИФФУЗНАЯ МАТЕРИЯ

§ 180. Открытия и классификация двойных звезд. Еще в середине XVII в. были обнаружены звезды, которые, ничем не отличаясь от других звезд, при наблюдениях невооруженным глазом, в телескоп представляются в виде двойных или даже кратных (т. е. тройных или четверных) звезд. Однако впервые серьезное внимание на такие звезды обратил лишь Вильям Гершель, который в 1784 г. составил каталог, содержащий данные наблюдений около 700 двойных и кратных звезд. Так как расстояния между компонентами двойных звезд гершелевского каталога в среднем составляли всего лишь несколько секунд дуги, то приходилось сомневаться в том, что такое близкое взаимное расположение звезд на небесной сфере могло быть, как правило, обязано случаю. Действительность вскоре подтвердила правильность такого рода сомнений. В. Гершель, основываясь на ряде своих наблюдений одних и тех же двойных звезд, а также на более старых наблюдениях, установил со всей очевидностью наличие орбитальных движений (т. е. движений по орбитам вокруг общего центра тяжести) у нескольких двойных звезд. Это открытие Гершеля было первым в истории астрономии фактом, показавшим распространение закона всемирного тяготения за пределы солнечной системы (1803). В. Я. Струве впервые произвел точные измерения расстояний между компонентами двойных звезд и направления линий, соединяющих компоненты. Он наблюдал свыше 2600 двойных звезд и почти в 100 случаях обнаружил у них орбитальные движения. Каталоги и многочисленные наблюдения двойных звезд В. Я. Струве и его сына до сих пор имеют огромную ценность. Струве доказал, что двойственность звезд является весьма частым явлением. Двойные звезды носят название *визуально-двойных*, если их двойственность может быть замечена при непосредственных наблюдениях в телескоп (а в редких случаях и невооруженным глазом: например, ζ и g Большой Медведицы, находящиеся друг от друга на расстоянии около $12''$). В результате работ ряда наблюдателей (среди которых видную роль сыграли работы астрономов Пулковской обсерватории) в каталоги к настоящему времени занесено более 30 000 визуально-двойных звезд.

Применение спектрального анализа привело к открытию в 1889 г. звезд с переменными лучевыми скоростями (линии в спектрах этих звезд периодически смещаются по принципу Доплера—Физо). Изучение этого явления показало, что каждая из таких звезд представляет собой двойную систему, компоненты которой настолько близки друг к другу, что их не удается рассмотреть в отдельности даже при помощи наиболее мощных телескопов. Такие звезды получили название *спектрально-двойных*.

Еще задолго до открытия спектрально-двойных звезд внимание астрономов привлекла звезда Алголь (β Персея), замечательная правильным наступлением периодов, в течение которых ее блеск уменьшается более чем втрое, а затем снова увеличивается до прежней величины. Изменение блеска Алголя было замечено в 1669 г., а в 1782 г., т. е. более чем 100 лет спустя, глухонемой юноша — любитель астрономии Джон Гудрайк — высказал остроумную догадку, что блеск Алголя изменяется вследствие затмения его темным спутником. Предположение это в дальнейшем получило полное подтверждение. В настоящее время известно почти $2\frac{1}{2}$ тыс. звезд, блеск которых периодически изменяется по тем же причинам, что и у Алголя. Эти звезды были названы *звездами типа Алголя*, или затменными (затмевающимися) переменными. Они составляют большую часть так называемых *затменно-двойных* звезд.

Таким образом, известно три типа двойных звезд: визуально-двойные, спектрально-двойные и затменно-двойные. Изучение звезд, входящих в каждый из этих типов, имеет очень важное значение уже потому, что до сих пор только двойные звезды (и, конечно, Солнце) служат источником наших знаний о звездных массах.

§ 181. Физические и оптические визуально-двойные звезды. Двойные звезды, у которых обнаружено орбитальное движение обоих компонентов вокруг общего центра тяжести, называются *физическими двойными*; те же звезды, у которых наблюдаемая близость компонентов происходит оттого, что эти компоненты, находясь на совершенно различных от нас расстояниях, расположены почти в точности по одному лучу зрения, называются *оптическими двойными*. В некоторых случаях взаимное линейное расстояние между компонентами физической двойной звезды настолько велико (например, третий компонент Капеллы, находящийся на расстоянии $12'$ от двух ярких компонентов), что их орбитальные движения происходят чрезвычайно медленно. В таком случае судить о том, представляет ли данная двойная звезда физическую или оптическую двойную, можно на основе сравнения собственных движений ее компонентов. Если эти собственные движения близки друг к другу и по величине, и по направлению, значит, двойная звезда физическая, в противном случае — оптическая. Изучение орбитального движения физических двойных звезд можно, конечно, производить, определяя изменение экваториальных координат обоих компонентов, происходящее с течением времени. Для этой цели можно пользоваться как абсолютными методами (меридианный круг), так

и дифференциальными методами (например, определяя положение каждого из компонентов относительно фона слабых звезд). Однако несравненно проще и точнее можно изучать относительное движение компонентов. С этой целью один из компонентов (обычно — более яркий, называемый *главной звездой*) принимают за неподвижный и изучают относительное движение другого компонента (менее яркого, называемого *спутником*). При этом при помощи окулярного микрометра или по фотографическому снимку измеряют две величины: расстояние между компонентами, обозначаемое буквой ρ и выражаемое в секундах дуги, и так называемый позиционный угол ψ между направлением от главной звезды к северному полюсу мира и линией, соединяющей главную звезду со спутником. Угол ψ отсчитывается от направления к полюсу мира против хода часовой стрелки от 0° до 360° .

Если повторять такие измерения одной и той же двойной звезды спустя некоторые промежутки времени, можно, получив ряд положений спутника относительно главной звезды, определить сначала видимую, а затем и истинную орбиты спутника.

До какого же предельно малого значения ρ дают возможность наблюдать визуально-двойные звезды величайшие телескопы? Оказывается, что это расстояние, помимо оптических свойств трубы, зависит также и от того, насколько сильно отличаются друг от друга по своему блеску компоненты двойной звезды. Чем различие в блеске больше, тем труднее рассмотреть слабый по блеску компонент. При одинаковом блеске компонентов (и при этом не очень большом) в сильнейшие телескопы можно наблюдать двойные звезды с ρ порядка $0''.05$.

Некоторые из двойных звезд чрезвычайно красивы вследствие резкого различия в окраске компонентов. Так, например, у двойной звезды γ Андромеды главная звезда оранжевая, а спутник — голубой. У двойной η Кассиопеи главная звезда желтая, а спутник — пурпуровый и т. п. В настоящее время известно, что такая разница в окраске объясняется главным образом причинами физиологического характера (контрастностью) и лишь отчасти зависит от действительного различия цвета компонентов.

Статистика показывает, что из звезд до 9-й видимой величины включительно $5\frac{1}{2}\%$ являются визуально-двойными звездами (значительная часть из них — кратные звезды). Для более ярких звезд процент двойных звезд повышается. Это объясняется как лучшей изученностью более ярких звезд, так и их относительной близостью. Во всяком случае визуально-двойные звезды — явление, весьма распространенное в звездном мире.

§ 182. Видимые и истинные орбиты. Видимые орбиты спутников визуально-двойных звезд всегда имеют форму эллипса. Однако главная звезда обычно оказывается не в фокусе такого эллипса. Происходит это вследствие того, что истинная орбита спутника рассматривается земным наблюдателем не как есть, а видимая орбита представляет собой ее проекцию на плоскость, перпендикулярную к лучу зрения. И только в тех редких случаях, когда эта плос-

кость совпадает с плоскостью истинной орбиты, видимая и истинная орбиты тоже совпадают, и главная звезда оказывается в фокусе видимой орбиты спутника.

Так как даже самые тщательные измерения расстояний между компонентами двойной звезды и углов положения не бывают свободны от ошибок.

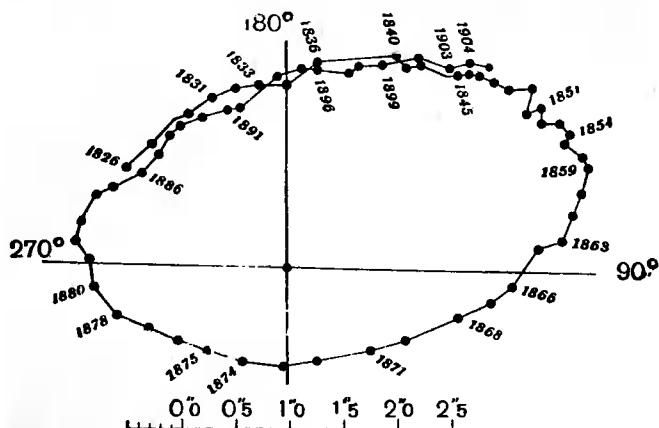


Рис. 204. Видимая орбита ξ Большой Медведицы

видимая орбита, построенная по этим измерениям, представляет собой ломаную кривую эллипсообразной формы (рис. 204). Превращение такой орбиты в эллиптическую приходится осуществлять, подбирая тем или иным способом эллипс, наиболее близкий к получившейся ломаной кривой. При этом нет необходимости ждать, пока спутник совершит полное обращение вокруг главной звезды, а можно ограничиться рядом наблюдений, охватывающих достаточно большую часть видимой орбиты (рис. 205).

Построив видимую орбиту, можно определить истинную орбиту. Для этого обычно находят следующие 7 элементов истинной орбиты¹:

P — период обращения, выраженный в годах.

T — момент прохождения спутника через периастр (ближайшую к главной звезде точку истинной орбиты).

e — эксцентриситет.

a — большая полуось орбиты, выраженная в секундах дуги.

i — так называемое наклонение орбиты, т. е. угол наклона плоскости орбиты к плоскости, перпендикулярной к лучу зрения.

Ω — позиционный угол одного из узлов орбиты, т. е. тех двух ее точек, в которых она пересекает плоскость, проходящую через главную звезду и перпендикулярную к лучу зрения (обычно берется тот позиционный угол, который меньше 180°).

ω — угол в плоскости орбиты от узла до периастра, считаемый в направлении движения спутника.

Движение спутника по орбите в подавляющем большинстве случаев происходит с небольшой линейной скоростью, вследствие чего лишь очень редко удается измерить изменения лучевой скорости спутника, меняющейся в не-

¹ При определении орбит планет солнечной системы (см. § 77) достаточно найти 6 элементов, так как период обращения планеты связан с большой полуосью третьим законом Кеплера, причем масса центрального тела, т. е. Солнца, для всех планет одна и та же.

больших пределах. Поэтому остается неизвестным, в котором из двух узлов орбиты спутник приближается к земному наблюдателю, а в котором — удаляется, по причине чего и не принято различать «восходящего» и «нисходящего» узлов орбиты (как это делается для тел солнечной системы).

Наклонение орбиты i считается положительным, если спутник удаляется от наблюдателя, проходя через узел, позиционный угол которого меньше 180° , и отрицательным, если спутник приближается, проходя через этот узел. Однако и в этом случае для придания углу того или иного знака необходимо знать характер изменения лучевой скорости спутника; это, как только что указывалось, удается сделать очень редко, и знак угла i в большинстве

случаев остается неизвестным. До настоящего времени удалось определить элементы орбит лишь очень небольшого числа визуально-двойных звезд. Происходит это главным образом вследствие того, что периоды обращений у большинства визуально-двойных звезд очень велики (исчисляются тысячами лет).

Значительно сложнее обстоит дело с определением орбит кратных звезд в тех случаях, когда три (или более) компонента находятся друг от друга на сравнительно небольших расстояниях и приходится, таким образом, иметь дело с задачей трех тел. Если же третий компонент находится на сравнительно большом расстоянии, движение всех трех компонентов происходит лишь с небольшими отклонениями от законов Кеплера, и задача определения их орбит упрощается.

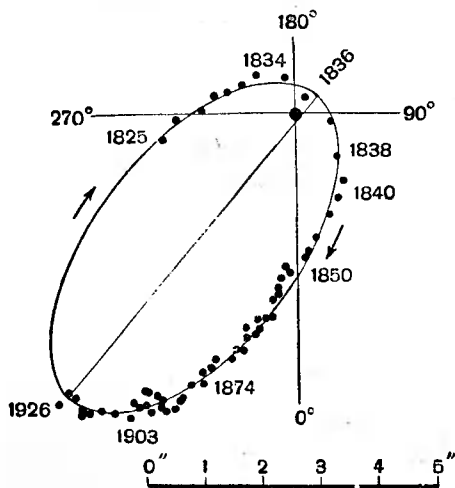


Рис. 205. Видимая орбита γ Девы

§ 183. Определение масс визуально-двойных звезд. Третий закон Кеплера в форме, полученной Ньютоном для случая движения спутника относительно центрального тела (см. § 73), дает следующее выражение для суммы масс центрального тела и спутника:

$$M_1 + M_2 = \frac{4\pi^2}{k^2} \cdot \frac{A^3}{P^2}, \quad (1)$$

где k^2 — гравитационная постоянная, A — большая полуось орбиты спутника, а P — период его обращения.

Применим выражение (1) для определения суммы масс компонентов визуально-двойной звезды и напомним подобное же выражение для суммы масс Солнца $M_\odot$ и Земли $M_\oplus$:

$$M_\odot + M_\oplus = \frac{4\pi^2}{k^2} \cdot \frac{A_\oplus^3}{P_\oplus^2}, \quad (2)$$

где $A_\oplus$ — астрономическая единица, а $P_\oplus$ — период обращения Земли вокруг Солнца, т. е. звездный год.

Разделим выражение (1) на (2) и, пренебрегая массой Земли из-за ее малости, получим:

$$\frac{M_1 + M_2}{M_{\odot}} = \left(\frac{A}{A_{\odot}} \right)^3 \cdot \left(\frac{P_{\odot}}{P} \right)^2. \quad (3)$$

Зная величину отношений $\frac{A}{A_{\odot}}$ и $\frac{P_{\odot}}{P}$, можно по формуле (3) вычислить, во сколько раз сумма масс компонентов двойной звезды больше массы Солнца.

Если принять за единицу длины астрономическую единицу, за единицу времени — звездный год и за единицу массы — массу Солнца, выражение (3) принимает очень простой вид:

$$M_1 + M_2 = \frac{A^3}{P^2}. \quad (4)$$

Период P является одним из семи элементов истинной орбиты, а большая полуось A связана следующим очевидным соотношением с большой полуосью истинной орбиты a , выраженной в секундах дуги¹, и с параллаксом π :

$$\frac{A}{A_{\odot}} = \frac{a}{\pi}. \quad (5)$$

Если же за единицу длины принять астрономическую единицу, то мы сможем написать:

$$A = \frac{a}{\pi}. \quad (6)$$

Таким образом, будем ли мы для вычисления масс пользоваться формулами (3) и (5) или более простыми формулами (4) и (6), в обоих случаях, кроме элементов орбиты a и P , необходимо знать также и параллакс звезды π .

Для того чтобы определить массу каждого из компонентов двойной звезды в отдельности, необходимо определить отношение расстояний главной звезды и спутника от их общего центра тяжести. С этой целью приходится производить более трудную работу по определению изменений экваториальных координат каждого из компонентов в отдельности хотя бы на протяжении сравнительно небольшого промежутка времени. Такую работу до сих пор удалось осуществить лишь для небольшого числа звезд. Для всех этих звезд найдены значения масс каждого из компонентов.

¹ a — угол, под которым с Земли видна большая полуось A истинной орбиты; π — угол, под которым со звезды видна большая полуось $A_{\odot}$ земной орбиты; так как расстояние в обоих случаях одно и то же, а углы a и π малы, то линейные размеры полуосей должны быть пропорциональны своим угловым размерам.

Элементы орбит и массы некоторых

№ п/п	Звезда	Видимая величина		Спектр. класс		Наклонение орбиты	Эксцентриситет
		главной звезды	спутника	главной звезды	спутника		
1	Капелла	0 ^m ,8	1 ^m ,2	G0	F5	41°	0,01
2	Крюгер 60	9,6	11,3	M3	?	26	0,38
3	Сириус	—1,6	8,0	A2	F0	43	0,59
4	ξ Большой Медведицы .	4,4	4,9	F9	G2	53	0,41
5	Кастор A, B	2,0	2,8	A1	A5	67	0,56

В качестве примера рассмотрим двойную звезду Сириус, для которой отношение масс компонентов оказалось равным 2,5. Элементы P и a истинной орбиты спутника относительно главной звезды и параллакс оказались:

$$P=50,0 \text{ лет, } a=7'',57 \text{ и } \pi=0'',376.$$

Подставляя эти величины в формулы (6) и (4), находим:

$$A=20,1 \text{ и } M_1 + M_2=3,2,$$

а так как $M_1 : M_2 = 2,5$, то $M_1 = 2,3$ и $M_2=0,9$, т. е. масса спутника немногим меньше массы Солнца.

В таблице 22 даются результаты определения элементов орбит и масс некоторых визуально-двойных звезд.

§ 184. Спектрально-двойные звезды. Характер и причина изменения спектров спектрально-двойных звезд объясняются рисунком 203¹.

Если очень близкие компоненты двойной звезды, движущиеся вокруг общего центра тяжести, мало отличаются друг от друга по спектру и по блеску², то в спектре такой звезды должно наблюдаться периодически повторяющееся раздвоение спектральных линий (см. левую часть рисунка 206).

Действительно, если один компонент занимает положение A_1 , а другой — положение B_1 , то оба они будут двигаться под прямым углом к лучу зрения, направленному к наблюдателю, и раздвоения спектральных линий не получится. Но если компоненты занимают положения A_2 и B_2 , то компонент A движется к наблюдателю, а

¹ На этом рисунке показано движение компонентов спектрально-двойных звезд на протяжении $1/4$ периода.

² При современных методах наблюдения блеск одного компонента в этом случае должен отличаться от блеска другого не более чем на 0,7 звездной величины.

визуально-двойных звезд

Период обращения в годах	Параллакс	Большая полуось		Абсолютная величина		Отношение расстояний до центра тяжести	Масса	
		в секундах	в астр. единицах	главной звезды	спутника		главной звезды	спутника
0,28	0",063	0",054	0,86	0 ^m ,1	0 ^m ,5	0,56 : 0,44	4,2	3,3
44,3	0,258	2,46	9,6	11,7	13,4	0,60 : 0,40	0,27	0,18
50,0	0,376	7,57	20,1	1,3	10,9	0,71 : 0,29	2,3	0,9
59,8	0,139	2,51	18,1	5,1	5,6	0,49 : 0,51	0,8	0,8
306,3	0,069	6,06	88	1,2	2,0	?	7,3	

компонент B — от наблюдателя, и раздвоение спектральных линий наблюдаться будет, так как у первого компонента спектральные линии сместятся к фиолетовому концу спектра, а у второго — к красному концу. Затем при дальнейшем движении компонентов

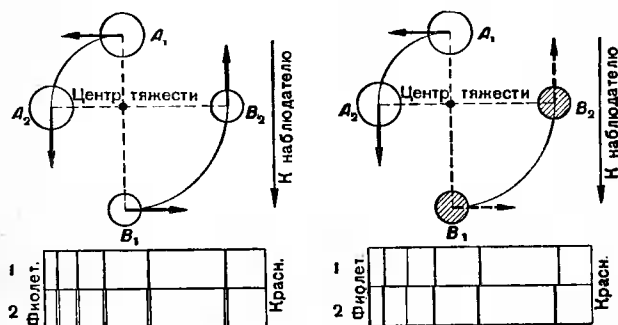


Рис. 206. Объяснение изменений в спектрах двойных звезд

раздвоение спектральных линий постепенно исчезнет (оба компонента будут опять двигаться под прямым углом к лучу зрения) и снова повторится, когда компонент A будет двигаться от наблюдателя, а компонент B — к наблюдателю. Таким образом, спектральные линии компонентов A и B будут совершать колебательные движения относительно некоторых средних своих положений, при которых они будут совпадать и которые соответствуют лучевой скорости центра тяжести системы.

В случае же, если один из компонентов значительно уступает по блеску другому компоненту (правая часть рисунка 206), раздвоение спектральных линий наблюдаться не будет (из-за слабости

спектра спутника), но колебания спектральных линий главной звезды будут происходить, как и в первом случае.

Нет никакого сомнения, что в большинстве случаев только что описанные изменения спектров действительно происходят вследствие двойственности звезд. Это подтверждается прежде всего тем, что некоторые из звезд, двойственность которых была открыта спектральным методом, в дальнейшем наблюдались как визуально-двойные (Капелла, α Пегаса и др.). С другой стороны, это подтверждается и фактом существования уже упоминавшихся в § 183

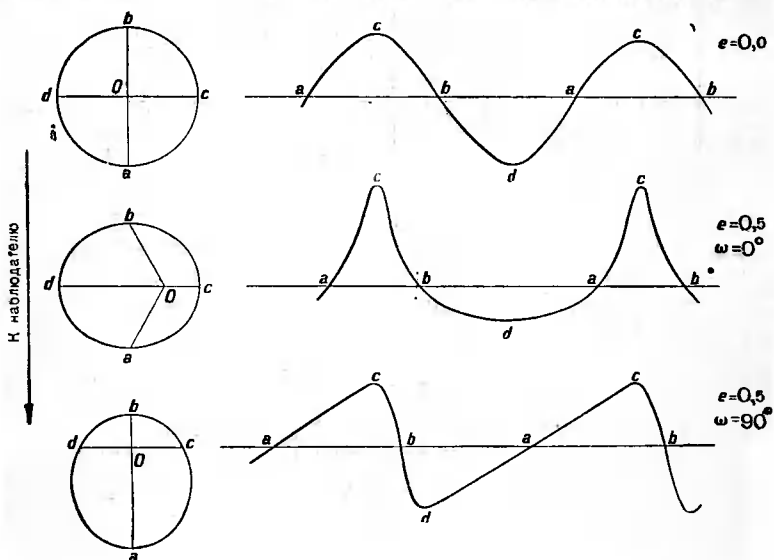


Рис. 207. Зависимость кривых лучевых скоростей от элементов орбит двойных звезд

затменно-двойных звезд, являющихся одновременно спектрально-двойными.

Периоды изменений, происходящих в спектрах спектрально-двойных звезд, очевидно, являющиеся и периодами их обращения, бывают весьма различны. Наиболее короткий из известных периодов 2,4 часа (γ Малой Медведицы), а наиболее длинные — десятки лет (ϵ Гидры, с периодом в 15,3 года, наблюдается также и в качестве визуально-двойной звезды).

§ 185. Определение орбит и масс спектрально-двойных звезд. Для определения элементов орбиты какой-либо спектрально-двойной звезды необходимо иметь достаточно большое количество спектрограмм (фотографий спектра) этой звезды, дающих возможность построить так называемую *кривую лучевых скоростей*. При построении этой кривой по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат — лучевые скорости. Форма кривой лучевых скоростей зависит только от двух элементов — эксцентриситета e и угла ω , определяющего положение периастра. Характерные образцы кривых лучевых ско-

ростей для некоторых частных значений e и ω изображены на рисунке 207. Положение горизонтальной прямой у всех кривых этого рисунка соответствует лучевой скорости, которую компоненты имеют при своем движении под прямым углом к лучу зрения (т. е., иными словами, лучевой скорости центра тяжести системы).

Независимо от применяемого способа из числа элементов орбит спектрально-двойных звезд могут быть определены только ω , a , P и T . Совершенно нельзя определить позиционного угла Ω , так как он не влияет на величину лучевых скоростей. Нельзя определить в отдельности наклонение i плоскости орбиты и большую полуось A , так как одни и те же лучевые скорости могут получиться при движении звезды по орбитам с различными наклонениями и соответственно различными большими полуосями. Постоянным остается лишь произведение $A \sin i$, которое и может быть определено, равно как может быть найдено значение произведения $M \sin^3 i$, в то время как сама масса M остается неизвестной¹.

Таблица 23

Элементы орбит и массы некоторых спектрально-двойных звезд

№ п/п	Звезда	Видимая величина	Спектр	Эксцентриситет	Период обращения в сутках	Полуамплитуда колебания лучевых скоростей в км/сек		Нижние пределы больших полуосей орбит, $A \sin i$		Нижние пределы масс $M \sin^3 i$	
						главная звезда	спутник	главная звезда	спутник	главная звезда	спутник
1	Звезда Пласскетта	6 ^m ,4	O8	0,04	14,4	206	247	41	49	76	63
2	β Скорпиона	2,9	B1	0,27	6,8	126	197	11	18	13	8
3	ξ Б. Медведицы A	2,4	A2	0,54	20,5	69	69	16	16	1,7	1,7
4	Капелла	0,2	G0	0,01	104,0	25,8	32,5	37	46	1,2	0,9

Следует иметь в виду, что в тех случаях, когда в спектре звезды видны линии обоих компонентов, можно определить значения элементов орбит (или их функций) для каждого из компонентов в отдельности. Если же спектральных линий звезды-спутника наблюдать нельзя, получаемые элементы относятся к движению главной звезды вокруг центра тяжести. В этом случае вместо произведения массы главной звезды на $\sin^3 i$ может быть определена только так называемая «функция масс», представляющая собой довольно сложное отношение:

$$\frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2}.$$

§ 186. Затменно-двойные звезды. При общем обзоре двойных звезд уже говорилось о существовании звезд, блеск которых периодически изменяется в результате затмения одного из компонентов другим, а в предыдущем параграфе было указано, что эти звезды одновременно являются спектрально-двойными.

Изменение блеска этих звезд наглядно изображается так называемыми кривыми блеска, при построении которых по оси абс-

¹ Таким образом, как для большой полуоси A , так и для массы M удастся определить только наименьшее из их возможных значений, соответствующее наибольшему из значений синуса угла наклона ($\sin i = 1$).

цисс откладывается время, а по оси ординат — видимые величины звезд. На рисунке 208 изображена кривая блеска Алголя, как уже указывалось, — первой из открытых затменно-двойных звезд. Общий характер изменения блеска этой звезды следующий. В течение $2^{\text{h}}11^{\text{m}}$ (округленно) блеск Алголя остается приблизительно постоянным. Затем наступает быстрое падение блеска, которое продолжается 5^{m} , после чего блеск начинает возрастать и еще через 5^{m} достигает первоначальной величины. Таким образом, весь период изменения блеска Алголя продолжается $2^{\text{h}}21^{\text{m}}$.

Исключительные по точности фотометрические наблюдения Алголя, произведенные с фотоэлектрическим фотометром, обнаружили

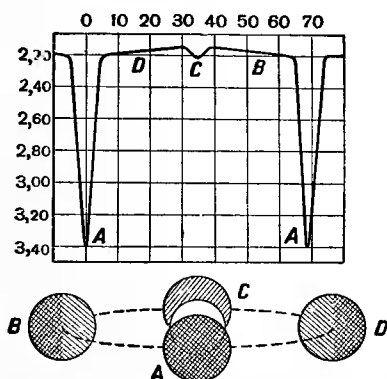


Рис. 208. Кривая блеска Алголя и схема движения его спутника

существование второго, очень слабо выраженного минимума блеска посередине между двумя смежными главными минимумами. Существование второго минимума показывает, что спутник Алголя не темный, а лишь имеет сравнительно с главной звездой небольшую поверхностную яркость. Помимо этого, часть своего света спутник, по-видимому, заимствует у главной звезды, вследствие чего сказывается влияние фаз спутника, и максимум блеска Алголя наступает не сразу после окончания затмения главной звезды спутником, а лишь перед самым началом затмения спутника.

У различных затменно-двойных звезд изменение блеска носит неодинаковый характер. Так, например, у звезды β Лыры изменение блеска происходит непрерывно, причем наблюдаются два одинаковых максимума и два неодинаковых минимума (рис. 209). В этом случае на изменение блеска звезды безусловно сильно влияет вытянутая эллипсоидообразная форма компонентов, вызванная их взаимным приливным действием, чрезвычайно сильным вследствие близости компонентов друг к другу. Таким образом, общий блеск звезды должен изменяться и в промежутки между затмениями в зависимости от изменения площади проекций эллипсоида компонентов на плоскость, перпендикулярную к лучу зрения.

Большой интерес представляет изучение небольшой группы затменно-двойных звезд, представителем которых является звезда 4-й величины ϵ Возничего, имеющая один из наиболее продолжительных периодов изменения блеска — 9890 суток. В то время как более яркий компонент звезды принадлежит к красным гигантам (спектральный класс K5), спутник относится к спектральному классу B8. При наличии значительной разности температур (отношение температур близко к 1:3) главная звезда во много раз

больше (в 20 с лишним раз по диаметру). В связи с этим затмение главной звезды спутником обнаружить не удастся. Зато затмение спутника главной звездой, происходящее в течение 40 суток, удалось наблюдать много раз. В начале и конце затмений в спектре звезды появились темные линии ионизированного кальция Н и К, смещенные в начале затмения к красному концу спектра, а в конце — к фиолетовому; это свидетельствует о вращении красного гиганта вокруг своей оси. Фотометрическое исследование спектрограмм звезды, полученных как в период затмения, так и вне его, дало возможность изучить строение атмосферы красного гиганта.

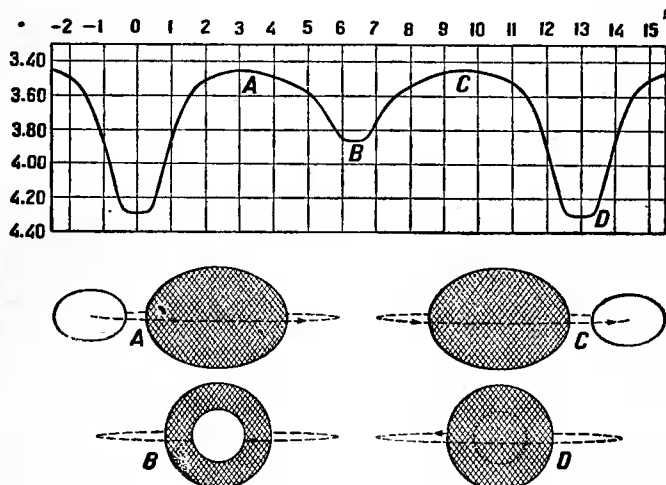


Рис. 209. Кривая блеска β Лиры и схемы движения ее спутника

§ 187. Определение орбит и физических характеристик затменно-двойных звезд. Изменения, наблюдаемые в спектрах затменно-двойных звезд, полностью согласуются с изменениями их блеска. Так, в моменты наступления затмений, когда оба компонента должны двигаться под прямым углом к лучу зрения, их лучевые скорости оказываются равными и раздвоения спектральных линий не наблюдается.

Таким образом, возможность определения орбит у затменно-двойных звезд та же самая, что и у спектрально-двойных, с добавлением очень важных данных, предоставляемых фотометрическими наблюдениями. С другой стороны, вследствие того что фотометрические наблюдения несравненно проще и доступнее спектральных, есть немало затменно-двойных звезд, у которых прекрасно изучены кривые блеска, но неизвестны кривые лучевых скоростей. Для таких звезд, основываясь только на фотометрических наблюдениях, все-таки можно определить два элемента их орбит — период P и наклонение i . Кроме того, оказывается возможным определить следующие физические характеристики этих звезд:

1) эллиптичность их дисков, т. е. отношение наименьшего диаметра диска к наибольшему, направленному вдоль линии, соединяющей центры компонентов;

2) значения диаметров обоих компонентов, выраженные в долях большой полуоси их относительной орбиты;

Элементы орбит и физические характеристики

№ п/п	Звезда	Видимая величина	Спектр. класс		Наклонение орбиты
			главной звезды	спутника	
1	АО Кассиопеи	6 ^m , 1—6 ^m , 3	O8	O8	52°
2	и Геркулеса	4, 6—5, 3	B3	B3	78
3	β Лиры	3, 5—4, 1	B3	B9	77
4	β Возничего	2, 1—2, 2	A0	A0	77
5	W Малой Медведицы	7, 9—8, 5	F8	F8	75
6	ζ Возничего	3, 9—4, 1	K5	B8	≈ 90

3) отношение яркостей компонентов;

4) приближенное значение их плотностей.

Если для затменно-двойной звезды известны и кривая блеска и кривая лучевых скоростей, можно получить результаты, исключительные по своей полноте (см. таблицу 23).

§ 188. Общие закономерности в двойных системах. Несмотря на то что подавляющее большинство открытых до настоящего времени двойных звезд всех трех типов остается еще не изученным, полученный и обработанный наблюдательный материал настолько велик и полноценен, что дает возможность установить ряд закономерностей в двойных системах, из которых мы рассмотрим лишь важнейшие.

1. Сравнение масс компонентов двойных звезд с их светимостями позволило установить исключительную по важности зависимость «масса — светимость», которая была первоначально выведена теоретическим путем. Сопоставление же масс компонентов с их спектрами показывает, что массы уменьшаются при переходе от более горячих звезд к более холодным.

2. Между орбитами визуально-двойных и спектрально-двойных звезд (в том числе и затменно-двойных) нет разрыва. Переход одних орбит к другим происходит постепенно. При этом наблюдается замечательно резко выраженная зависимость между периодами обращения двойных звезд и эксцентриситетами их орбит. Эта зависимость, которую некоторые исследователи пытались применить к проблеме эволюции звезд, состоит в том, что среднее значение эксцентриситета орбит непрерывно увеличивается одновременно с увеличением среднего значения периода обращения.

3. Сопоставление спектральных классов компонентов с их относительным блеском показывает, что в тех случаях, когда компоненты мало отличаются друг от друга по блеску, они близки друг к другу и по спектральному классу.

С другой стороны, в спектрально-двойных системах значительно чаще встречаются горячие звезды, чем в визуально-двойных системах. Так, для звезд 6-й видимой величины включительно к спектральным классам O и B принадлежат из числа визуально-двойных звезд только 44%, а из числа спектрально-двойных звезд — 57%. Среди затменно-двойных процент горячих звезд еще выше.

В заключение необходимо отметить, что масса спутников в двойных системах лишь немногим меньше (в среднем) масс главных звезд. Эти двойные системы коренным образом отличаются от солнечной системы, в которой сумма масс всех планет составляет меньше $\frac{1}{700}$ доли массы Солнца.

Таблица 24

некоторых затменно-двойных звезд

Период обра- щения в сутках	Сумма больших полуосей орбит в млн. км	Наибольший радиус ($\odot=1$)		Эллиптичность дисков	Светимость (относитель- ная)		Масса $\odot=1$		Плотность $\odot=1$	
		главной звезды	спутника		главной звезды	спутника	главной звезды	спутника	главной звезды	спутника
3,52	27,9	24	16	0,96	0,71	0,29	36,3	33,8	0,003	0,009
2,05	10,3	4,6	4,6	0,93	0,70	0,30	7,3	2,8	0,094	0,036
12,92	50	41	18	0,8	0,63	0,37	18,0	7,4	0,0004	0,0024
3,96	12,3	2,8	2,8	0,99	0,50	0,50	2,4	2,4	0,11	0,11
0,33	1,6	0,9	0,7	0,85	0,60	0,40	0,75	0,54	2,1	3,1
972	840	192	8,5	1,00	0,8	0,2	15	8	$2 \cdot 10^{-6}$	0,013

§ 189. Невидимые спутники звезд. У некоторых ближайших к нам звезд были обнаружены крайне малые периодические изменения в их положениях на небе. Они напоминают отклонения, которые обнаруживает Сириус под действием притяжения своего спутника. Такие отклонения можно объяснить только притяжением этих звезд невидимыми спутниками, имеющими массы, значительно меньшие, чем массы звезд, как явствует из малости наблюдаемых отклонений изучаемых звезд. При этом период отклонения есть период обращения невидимого спутника и по закону Кеплера совместно с массой определяют его расстояние от звезды. Так, например, у звезды 61 Лебедя есть невидимый спутник, обращающийся с периодом в 5 лет на расстоянии около 3 астрономических единиц от звезды. Он имеет массу, в 60 раз меньшую, чем у Солнца, но в 16 раз большую, чем у Юпитера. Возможно, что такие спутники являются либо очень крупными планетами, либо телами, промежуточными между звездами и планетами. Это открытие крайне важно в мировоззренческом отношении. Оно показывает, что системы, подобные солнечной, действительно существуют, что наша солнечная система вопреки идеалистическим воззрениям не является исключительной во Вселенной.

§ 190. Открытия и классификация переменных звезд. В 125 г. до н. э. греческий астроном Гиппарх обнаружил в созвездии Скорпиона звезду, которой он раньше не видел. Это неожиданное открытие побудило его предпринять работу по составлению звездного каталога, чтобы впоследствии, на основании этой переписи звезд, можно было установить, какие звезды появились вновь и какие, может быть, исчезли.

Огромное большинство звезд, видимых на небе, представляется нам всегда неизменного блеска. Только длительные и тщательные наблюдения привели к выводу, что существует довольно значительное число таких звезд, блеск которых определенным образом меняется.

Такие звезды получили наименование *переменных звезд*. Первое открытие переменной звезды было сделано в 1596 г., когда заметили в созвездии Кита звезду примерно 2-й величины, которой раньше никогда не было видно. Напрасно искали эту звезду на небе в октябре следующего года. После этого за звездой стали следить, и вскоре было установлено, что блеск ее изменяется периодически. Звезда эта получила название «Mira Ceti», что значит «Удивительная Кита»; это название осталось за ней до настоящего времени.

С конца XVIII в. было найдено много переменных звезд, и в настоящее время число известных переменных звезд превысило 15 000. В нашем столетии число известных переменных звезд из года в год увеличивается главным образом в результате применения фотографического метода для их открытия и для наблюдений изменений их блеска. Колебания блеска переменных звезд обычно заключаются в пределах от одной десятой доли звездной величины до нескольких звездных величин.

Переменные звезды обозначаются заглавными буквами латинского алфавита с указанием созвездия, к которому они относятся, и в следующем порядке (по порядку их открытия): R, S, ..., Z, RR, RS, ..., RZ, SS, ST, ..., ZZ, AA, AB, ..., OZ,

Если число переменных в данном созвездии превышает 334, то комбинаций буквенных обозначений уже не хватает, и тогда переменные обозначаются просто буквой V (от латинского слова *variabilis* — переменная) с прибавкой номера переменной звезды в данном созвездии, начиная с 335. Например: V 339 Скорпиона.

Переменные звезды характеризуются прежде всего кривыми блеска, т. е. кривыми, показывающими характер изменения их блеска как функции времени, а также спектральными данными, характеризующими физические особенности звезд. С этой точки зрения переменные звезды прежде всего надо разделить на затменные переменные и физические переменные. Затменные переменные, или алголи, уже были рассмотрены в § 186. У всех остальных переменных звезд изменение блеска обусловлено какими-то физическими причинами, изменениями физического состояния звездных атмосфер, а в некоторых случаях и недр звезд. Ниже мы рассмотрим только физические переменные звезды. Классификация переменных звезд, если не вдаваться в детали, может быть представлена в следующем виде:

Периодические переменные звезды.
Неправильные переменные звезды.
Новые звезды.

Периодическими переменными звездами являются цефеиды и долгопериодические переменные звезды.

Для цефеид и долгопериодических переменных характерно, что максимумы их блеска наступают один после другого через определенный промежуток времени.

Неправильные переменные звезды меняют свой блеск без всякой периодичности, не сохраняя строго амплитуды, хотя встречаются звезды полупериодические, у которых в течение некоторого времени наблюдается некоторая, хотя и не строгая, периодичность.

Новые звезды представляют совсем особое явление, о котором подробно говорится в § 194.

Наблюдение изменения блеска переменных звезд и некоторые выводы отсюда об их природе доступны самым широким кругам астрономов-любителей, в том числе учащимся. Для наблюдения

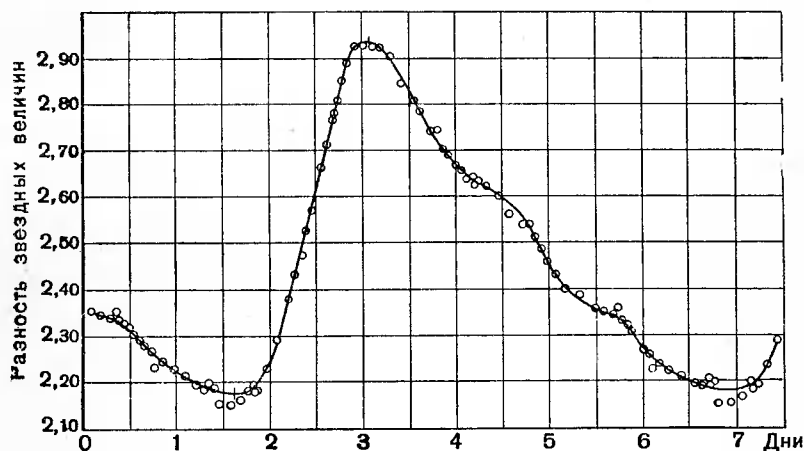


Рис. 210. Кривая блеска δ Цефея

ярких звезд не нужно телескопа, хотя бинокль желателен. В СССР изучение переменных звезд стоит на большой высоте. Поэтому в 1946 г. московским астрономам было поручено систематически подводить итоги изучения переменных звезд в международном масштабе.

§ 191. Цефеиды. Цефеидами называются переменные звезды с кривыми блеска, имеющими характер, изображенный на рисунке 210, обладающие следующими свойствами:

1. Непрерывным и периодическим изменением блеска с амплитудой около одной звездной величины.
2. Изменением лучевых скоростей, связанным с кривой блеска, причем скорость наибольшего приближения соответствует максимуму блеска, а скорость наибольшего удаления — минимуму блеска.
3. Изменением температуры, параллельным изменению блеска, с максимумом температуры в момент максимума блеска, и обратно.

Периоды известных цефеид заключены в пределах от нескольких десятков минут до 45 суток. Цефеиды довольно резко распадаются на две группы:

1) с периодами короче суток, называемые *короткопериодическими цефеидами* (иначе, звездами типа RR Лиры) и

2) с периодами более суток, называемые *долгопериодическими цефеидами*. У всех цефеид блеск усиливается быстрее, чем ослабевает после максимума. Все цефеиды являются звездами-гигантами сравнительно ранних спектральных классов от А до G. Чем позднее спектральный класс цефеиды, тем продолжительнее ее период, чем больше амплитуда изменения блеска цефеиды, тем больше и амплитуда колебаний ее лучевой скорости (рис. 211). В среднем

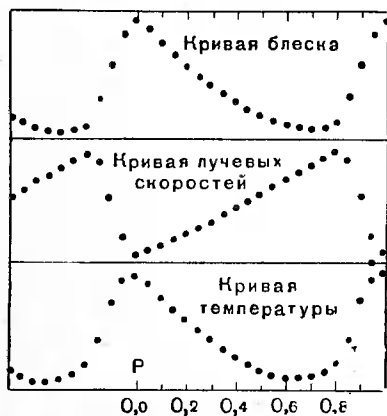


Рис. 211. Кривые блеска, лучевых скоростей и температур цефеиды

изменение температуры цефеиды в течение одного периода изменения ее блеска составляет около 800° , и в соответствии с этим изменяется и спектральный класс звезды. Например, δ Цефея, типичная представительница цефеид, по имени которой получил свое название весь класс этих переменных звезд, в максимуме принадлежит к классу F4, а в минимуме — к классу G6.

Наиболее важной оказалась обнаруженная эмпирически зависимость между абсолютной величиной цефеиды и ее периодом. На рисунке 212 представлена эта связь, причем мы видим, что, оставляя в стороне короткопериодические цефеиды (абсолютная

величина которых независимо от периода равна нулю), абсолютная величина цефеид убывает пропорционально росту логарифма периода изменения блеска. Это свойство цефеид было установлено следующим образом.

Звездная система, получившая название Малого Магелланова Облака, находится от нас на чрезвычайно большом расстоянии, которое во много раз превышает размеры самого звездного облака. В Малом Магеллановом Облаке было открыто много цефеид различной видимой яркости и периода. Так как по своему видимому блеску эти цефеиды отличаются практически настолько же друг от друга, как и по светимости (вследствие того, что расстояния от нас до них всех практически одинаковы), можно было нанести на график их видимые величины (отличающиеся от их абсолютных величин на некоторую постоянную) и логарифмы их периодов. Тут-то и обнаружилась упомянутая зависимость: абсолютная величина цефеид уменьшается с увеличением логарифма периода, т. е. *светимость цефеид растет вместе с ростом их периода* (рис. 212).

Эта замечательная связь между светимостью и периодом, причина которой нам до сих пор еще не ясна, играет исключительную

роль при определении расстояния до далеких звездных систем. Если в некоторой далекой звездной системе обнаружены цефеиды, то мы из непосредственных наблюдений без труда определяем среднюю видимую звездную величину этих цефеид m и период изменения их блеска P . Тогда по кривой, изображенной на рисунке 212, мы определяем, какой средней абсолютной величине соответствует данный период цефеиды, наблюдаемой в далекой звездной

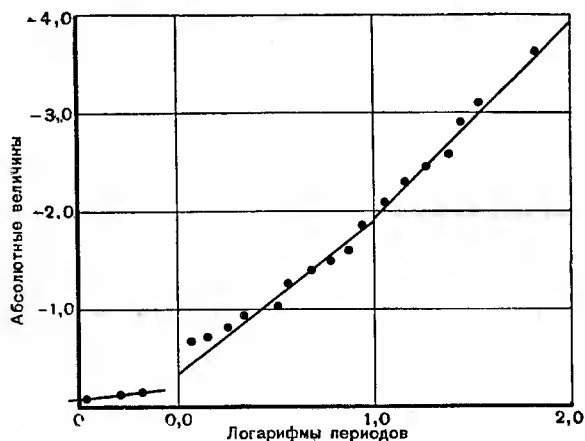


Рис. 212. Кривая «период—светимость» для цефеид (по исследованию Б. В. Кукаркина)

системе. Подставив найденную нами среднюю абсолютную величину M и среднюю видимую величину m , определенную из наблюдений, в формулу

$$M = m + 5 + 5 \lg \pi,$$

мы находим параллакс цефеиды π , а тем самым параллакс той звездной системы, в которой она находится. Этот способ определения расстояния до отдаленных звездных систем, какими являются шаровые скопления (см. § 207) и спиральные галактики (см. § 211), оказывается наиболее точным.

В настоящее время общепринятой теорией, объясняющей изменения, происходящие в цефеидах, является теория пульсации. Согласно этой теории, разработанной математически, *цефеиды представляют собой пульсирующие газовые шары, которые в момент максимума блеска обладают наименьшим объемом и одновременно — наивысшей температурой*. Затем происходит расширение звезды, при котором ее температура падает, а поверхность, обращенная к наблюдателю, приближается к нему, вследствие чего в спектре наблюдается смещение линий, описанное выше. Вследствие этого охлаждения, несмотря на увеличение размеров, блеск звезды

ослабевает. Сопоставление кривой изменения блеска и кривой лучевых скоростей, представленное на рисунке 212, не вполне соответствует такой простой теории, потому что согласно теории в момент максимума блеска лучевая скорость, определенная по изменению линий спектра, должна была бы равняться нулю. Между тем наблюдения показывают, что в это время скорость приближения наибольшая. Указанное несоответствие объясняется тем, что блеск звезды обуславливается размером и яркостью ее фотосферы, а сдвиг темных линий спектра — движением ее хромосферы, которые у цефеиды пульсируют с некоторой разностью фаз.

§ 192. **Долгопериодические переменные звезды.** Периоды от 45 до 90 дней встречаются у переменных звезд очень редко, и звезды

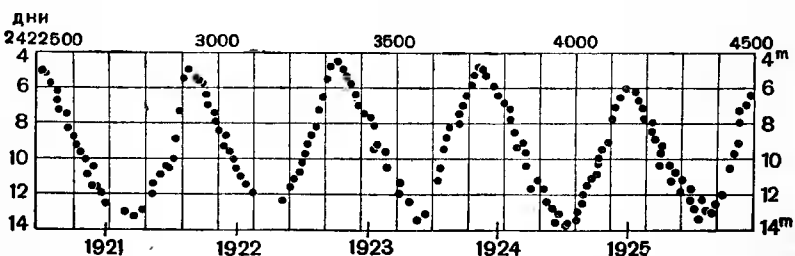


Рис. 213. Кривая блеска χ Лебедя

с такими периодами от 90 до 700 дней характеризуют долгопериодические переменные звезды. Блеск долгопериодических переменных, как и у цефеид, возрастает быстрее, чем он ослабевает после максимума, но кривая блеска значительно менее постоянна. Меняются и форма кривых, и блеск в максимуме и минимуме, и промежутки времени между отдельными максимумами, хотя все это происходит в не слишком больших пределах, оставляющих общий характер изменений постоянным. На рисунке 213 представлены согласно наблюдениям несколько последовательных циклов изменений переменной звезды χ Лебедя. В максимуме она бывает 4-й звездной величины, т. е. хорошо видна невооруженным глазом, а в минимуме ослабевает до 13-й звездной величины, когда ее можно видеть только в сильный телескоп.

Долгопериодические переменные являются звездами-гигантами поздних спектральных классов, преимущественно класса M, а иногда классов S и N. Чем дольше период, тем более поздним является спектральный класс звезды. Почти у всех долгопериодических переменных вблизи максимума в спектре наблюдаются яркие линии водорода, а иногда и металлов. Температура долгопериодических переменных звезд меняется в среднем от 1900 до 2500°, и оказывается, что болометрическая амплитуда их значительно меньше визуальной. Болометрическая амплитуда долгопериодических переменных составляет всего лишь около одной-двух звезд-

ных величин. Яркие и темные линии спектра долгопериодических переменных обнаруживают периодические смещения, связанные с фазой изменения блеска.

Причиной изменения блеска долгопериодических переменных, как и цефеид, является пульсация. Однако, как доказал академик Г. А. Шайн, эти явления вблизи максимума сопровождаются извержениями горячих газов из недр в более высокие холодные слои атмосферы, что и вызывает появление ярких линий в спектре.

§ 193. Неправильные и полуправильные переменные звезды можно разбить на целый ряд подклассов. Для того чтобы получить представление о том разнообразии, которое встречается среди них,

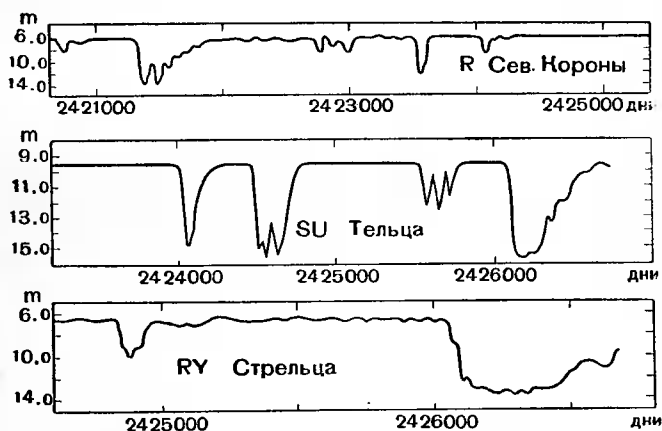


Рис. 214. Кривые блеска трех неправильных переменных звезд

достаточно посмотреть на рисунок 214, на котором представлены некоторые разновидности неправильных переменных звезд. Амплитуда изменения блеска их весьма разнообразна: от нескольких сотых звездной величины до нескольких звездных величин. В спектрах этих тоже холодных и гигантских звезд, принадлежащих в большинстве к спектральным классам М и N, наблюдаются изменения, в общих чертах сходные с изменениями у долгопериодических переменных.

§ 194. Новые звезды. Данные наблюдений. Новыми звездами называется совершенно особый вид звезд, природа которых станет ясной из следующего примера.

В 1572 г. астрономы были поражены, увидев в созвездии Кассиопеи яркую звезду, которую они никогда до тех пор в этом месте неба не видели. В ближайшие дни звезда достигла такого блеска, что ее можно было заметить даже днем при полном солнечном свете. Однако уже через несколько дней ее блеск стал ослабевать; то немного вспыхивая снова, то угасая, звезда в общем неуклонно ослабевала в блеске и через два года совершенно скрылась из виду.

Телескоп в то время еще не был изобретен, и что произошло дальше со звездой, осталось неизвестным. Таким образом, в науку вошел термин «новая звезда» как определение звезды, которую раньше никто не видел.

В наше время обычно удается найти на той или иной обсерватории снимки той области неба (снятой за несколько дней, а иногда даже и за несколько часов до момента открытия новой звезды), в которой появляется новая звезда. В таких случаях оказывается, что так называемая новая звезда в действительности существовала и раньше, но что с ней, по-видимому, произошла какая-то катастрофа, вследствие которой блеск звезды в течение нескольких дней увеличился в десятки тысяч раз. Например, новая звезда в созвездии Орла, в 1918 г. достигшая 1-й величины, до вспышки была в течение нескольких десятилетий, как показывают фотографии, звездой 10,5 величины.

В среднем, амплитуда изменения блеска новых звезд составляет 11 звездных величин, т. е. при вспышке происходит усиление блеска в 25 тыс. раз. Термин «новая звезда» является, очевидно, не вполне удачным, так как в данном случае имеет место не появление действительно новой звезды, а лишь чрезвычайно быстрое и сильное увеличение блеска какой-то слабой звездочки, уже существовавшей ранее.

Новые звезды, которые в наибольшем блеске достигают 1-й величины, вспыхивают довольно редко. Такие яркие новые звезды за последние три столетия наблюдались в 1604 г. в Змееносце, в 1901 г. — в Персее, в 1918 г. — в Орле, в 1925 г. — в Живописце, в 1934 г. — в Геркулесе и в 1942 г. — в Корме. Интересно отметить, что ввиду неожиданности такого рода вспышек открытие новых звезд производится случайно, по преимуществу астрономами-любителями. Подсчеты показывают, что в пределах нашей звездной системы, так называемой Галактики, ежегодно вспыхивают до 200 новых звезд, но большинство их находится очень далеко от нас, и поэтому большинство их ускользает от нашего внимания.

После наибольшего блеска, которого звезда, как уже говорилось, достигает в течение нескольких дней или часов после начала вспышки, начинается ослабление блеска, и *через несколько лет звезда возвращается к тому самому блеску, который она имела до вспышки.* Кривые изменений блеска трех типичных новых звезд представлены на рисунке 215, на котором по оси ординат отложены видимые звездные величины, а по оси абсцисс — время в сутках, отсчитываемое от момента наибольшего блеска. До сих пор наука почти не располагает данными о спектрах новых звезд до момента их наибольшей яркости, и поэтому необходимо в случае открытия новой звезды немедленно телеграфировать об этом в крупную обсерваторию, чтобы астрономы могли немедленно приступить к изучению этой исключительно краткой стадии в жизни новой звезды.

Вокруг нескольких новых звезд через некоторое время после их вспышки были обнаружены маленькие туманные пятнышки.

Последующие наблюдения показали, что эти маленькие туманные пятнышки расширяются с постоянной скоростью, постепенно становятся все больше и больше, но при этом постепенно ослабевают.

Удивительными и интересными являются изменения, наблюдаемые в спектрах новых звезд, происходящие в строгом



Рис. 215. Кривые блеска трех новых звезд

соответствии с изменениями блеска этих звезд. Оказывается, что до момента достижения наибольшего блеска спектр звезды похож на обычные звездные спектры, т. е. это спектр с темными линиями поглощения, относящийся к ранним подклассам спектральных классов А или F (рис. 216). В это время темные линии смещены к фиолетовому концу спектра, которые, если это трактовать как эффект Доплера — Физо, показывают приближение звезды к нам со скоростью порядка нескольких сот километров в секунду. В момент наибольшего блеска вместо темных линий в спектре появляются широкие яркие полосы на фиолетовом крае их появляются темные линии, смещенные со своего нормального положения на величину, соответствующую опять-таки скорости приближения к нам порядка 1000 км/сек. В дальнейшем ото дня ко дню спектр испытывает сильные изменения.

Анализируя такое развитие спектра новой звезды, можно заметить, что постепенно в спектре появляются линии все более и более трудно ионизируемых атомов, что свидетельствует о повышении температуры звезды с течением времени. На определенной стадии развития, когда блеск звезды ослабел

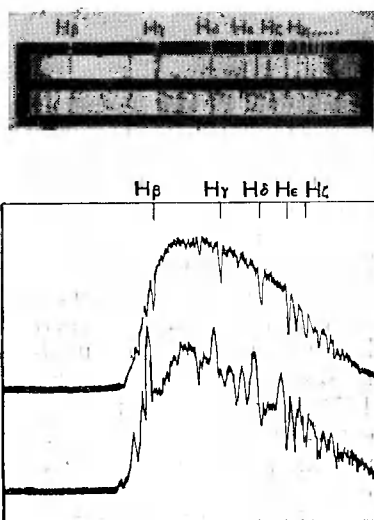


Рис. 216 Спектры и микрофотограммы новой звезды до и после максимума

уже довольно сильно, в ее спектре появляются яркие линии, никогда не наблюдающиеся в спектрах обычных звезд, но характерные для спектра газовых туманностей. По истечении многих лет линии туманности в спектре очень ослабевают, и звезда приобретает спектр типа Вольфа—Райе — яркие широкие полосы на фоне непрерывного спектра.

§ 195. **Сверхновые звезды** представляют собой такого же рода явление, как и описанные выше новые звезды, с тем лишь различием, что в данном случае амплитуда изменения блеска еще в сотни

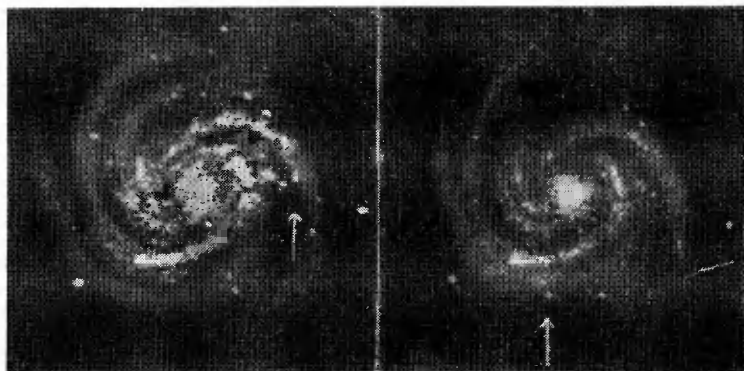


Рис 217. Две фотографии далекой спиральной звездной системы со сверхновыми звездами

раз больше. В своем наибольшем блеске сверхновые звезды светятся так же ярко, как те несколько миллиардов обычных звезд, которые составляют звездную систему, внутри которой какая-то звездочка вдруг вспыхнула как сверхновая. Такие сверхновые звезды вспыхивают в одной звездной системе один раз за несколько столетий.

Зная гигантское расстояние до звездных систем и до тех сверхновых звезд, которые в них вспыхивают, можно составить себе представление о том, какое чудовищное количество энергии эти звезды в действительности излучают во время своей вспышки. Новые звезды 1572 и 1604 гг. были сверхновыми звездами, вспыхнувшими в пределах нашей Галактики, как и сверхновая 1054 г., оставившая после своей вспышки быстро расширяющуюся «крабовидную» туманность (рис. 221). От газовых туманностей, возникших в результате вспышек этих сверхновых звезд, к Земле идет мощное радиоизлучение.

§ 196. **Объяснение явлений, наблюдающихся в новых и сверхновых звездах.** Катастрофическое увеличение блеска новых звезд объясняется тем, что по какой-то причине световое давление в них внезапно увеличивается настолько, что наружные слои звезды под

действием этого давления начинают быстро расширяться. Увеличение светящейся поверхности вызывает увеличение блеска звезды до тех пор, пока выброшенная газовая оболочка не станет слишком разреженной и прозрачной. С этого момента блеск звезды начинает падать, так как оболочка в области непрерывного спектра излучает все меньше. Части последней, двигаясь при расширении под разными углами к лучу зрения, имеют различные лучевые скорости, излучаемые ими яркие линии вследствие эффекта Доплера — Физо смещаются неодинаково. Совокупность этих ярких линий создает широкую яркую полосу в спектре. Передняя часть оболочки,

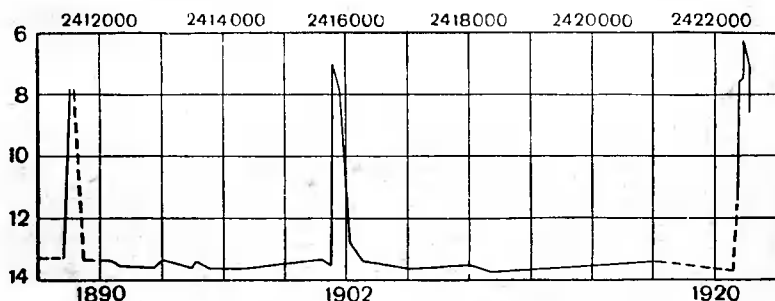


Рис. 218. Кривая блеска Т Компаса

проектирующаяся на звезду, поглощает свет последней, образуя в спектре темную линию, смещенную к фиолетовому концу спектра на величину, соответствующую скорости расширения оболочки. Последняя доходит до 2—3 тыс. км/сек. Эта скорость, превосходящая параболическую скорость на поверхности звезды, приводит к тому, что газы оболочки навсегда улетают в мировое пространство и рассеиваются в нем. Когда оболочка становится уже достаточно обширной, но еще не рассеялась, она видна непосредственно в телескоп как расширяющееся туманное пятнышко. Если выброс материи при вспышке не симметричен, то образовавшиеся сгустки газа могут временно произвести впечатление разделения звезды на части. Масса газовой оболочки, выброшенной звездой, составляет 10^{-4} — 10^{-5} массы Солнца.

При вспышке обнажаются более внутренние и горячие слои звезды. Под действием их излучения и расширения оболочки, плотность которой при этом падает, физические условия в этой оболочке сильно меняются и поэтому сильно меняется ее спектр.

Известны звезды, вспышки которых слабее, чем у новых звезд, но которые повторяются, причем явления в спектре и у тех и у других почти одинаковы. Примером таких «повторных» новых звезд является Т Компаса, вспыхивавшая в 1891, 1902, 1920 и 1944 гг. (рис. 218). Московские астрономы П. П. Паренаго и



Рис. 219. Большая диффузная туманность в Орионе

Б. В. Кукаркин установили, что у таких звезд **средний** промежуток между вспышками возрастает с амплитудой вспышки. Можно было ожидать поэтому, что и те новые звезды, вспышки которых наблюдались лишь однажды, тоже повторяют свои вспышки, но по истечении сотен и тысяч лет. Действительно, одна из них, вспыхнувшая в 1866 г., в соответствии с ожиданиями советских ученых в 1946 г. вспыхнула снова.

Физическое состояние повторных новых звезд до и после вспышки одинаково и тоже, по-видимому, относится к обычным новым звездам. В этом своем «нормальном» состоянии новые звезды оказываются белыми и горячими звездами очень различной плотности и светимости, как это было выяснено Б. А. Воронцовым-Вельяминовым. Последний обнаружил, что на диаграмме «спектр—светимость» эти звезды заполняют все пространство между звездами типа Вольфа—Райе и белыми карликами, образуя последовательность бело-голубых звезд. Избыток их массы извергается в пространство, постепенно становясь все менее массивным и менее ярким, но все более плотным, а вспышки становятся все сильнее, но все реже, пока звезда, может быть, превращается в устойчивого белого карлика подобно спутнику Сириуса.



Рис. 220. Диффузная туманность в Стрельце

Из сказанного выше следует, что нашему Солнцу не грозит опасность вспышки, так как оно не принадлежит к категории горячих звезд низкой светимости. Механизм самой вспышки звезд еще не ясен. Возможно, он связан с изменением атомных реакций внутри звезды, наступающих вследствие обеднения звезды водородом, превращение которого в гелий сопровождается выделением энергии, поддерживающим излучение звезды.

§ 197. Диффузная материя. В звездной Вселенной, кроме звезд, присутствует еще сравнительно разреженная, неоформленная, т. е. диффузная, материя, занимающая огромный объем. Диффузная материя наблюдается нами в форме светлых и темных галактических туманностей и межзвездной среды. *Галактические туманности делятся на диффузные* (неправильные, клочковатые, как, например, туманность Ориона (рис. 219) или туманность в Стрельце (рис. 220) и планетарные — маленькие, правильных очертаний, со звездочкой в центре (рис. 222). По своему положению в пространстве и те и другие туманности называются галактическими потому,

что они находятся в пределах нашей Галактики, тогда как, кроме них, на небе можно видеть туманные пятнышки, на первый взгляд такого же вида, но которые при подробном исследовании оказываются чрезвычайно далекими от нас звездными системами. Такие далекие звездные системы, имеющие в телескоп вид светлых туманных пятнышек, называются *внегалактическими туманностями*, поскольку они лежат за пределами нашей Галактики.

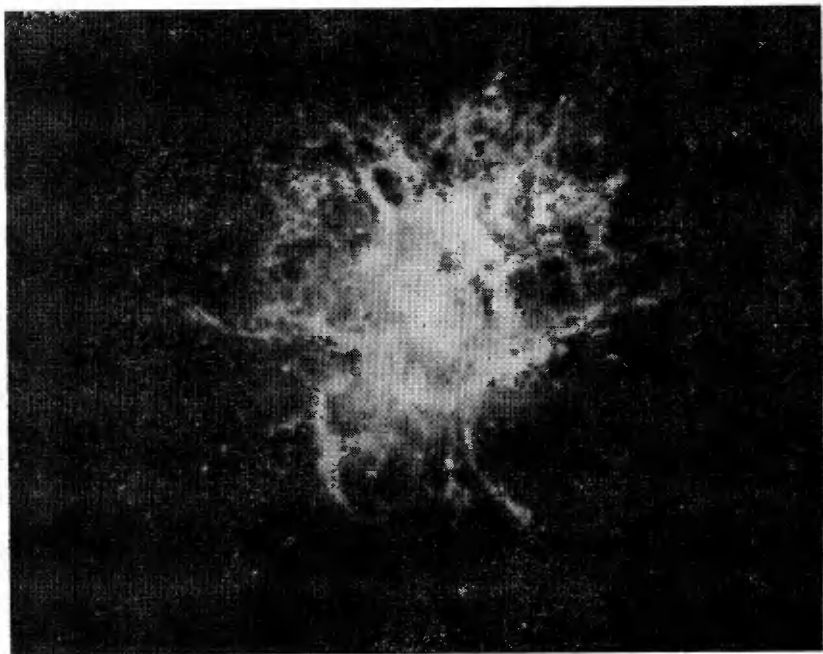


Рис. 221 Крабовидная туманность

Диффузные туманности по своему виду делятся на светлые и темные. Примером светлых диффузных туманностей являются большая туманность в Орионе (рис. 219) и туманность в Стрельце (рис. 220), примером темных — туманность в Змееносце (рис. 223).

Темные туманности и выглядят, как темные пятна на сияющем фоне Млечного Пути. Помимо этого, имеется вещество, которое заполняет пространство между звездами и частично состоит из разреженной пыли, частично из разреженных газов.

§ 198. Планетарные туманности. В настоящее время известно около 350 планетарных туманностей. Планетарные туманности имеют небольшие угловые размеры. Самая большая из них — это туманность в созвездии Водолея, имеющая диаметр 12'. Некото-

рые из планетарных туманностей имеют вид кружков неравномерной яркости, и многие из них похожи на кольца дыма, которые умеют пускать искусные курильщики. Самой яркой из таких кольцеобразных туманностей является туманность в Лире (рис. 222), которую можно видеть в телескоп с объективом диаметром в 10 см и более.

В центре планетарной туманности всегда находится слабая звездочка, спектр которой неизменно принадлежит к классу O, т. е. к классу наиболее горячих звезд.

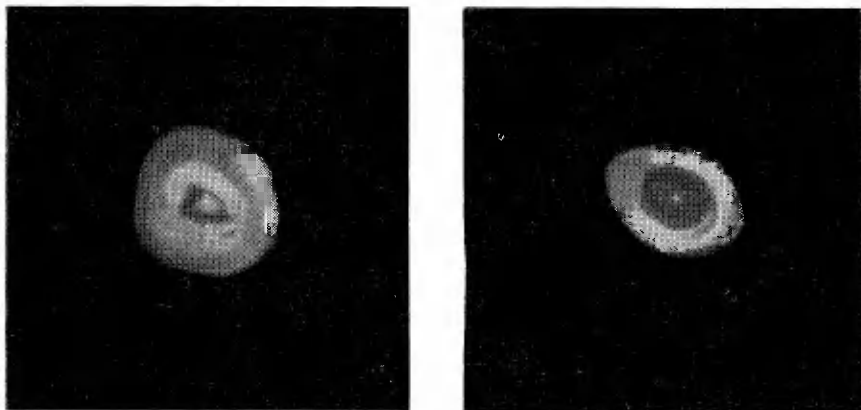


Рис. 222. Планетарные туманности в Андромеле (*слева*) и Лире (*справа*)

Кольцевая форма таких туманностей, как туманность Лир, является кажущейся. Она не имеет формы, аналогичной форме бублика, а представляет собой почти сферическую оболочку некоторой толщины, отделенной от ядра сравнительно пустым промежутком. Вследствие того, что вещество туманности очень прозрачно, наблюдаемая нами яркость туманности определяется количеством светящегося вещества, которое в данном направлении пронизывает луч зрения. Легко понять, что по направлению к центру туманности, которая внутри полая, луч зрения пронизывает меньшую толщину светящегося вещества, чем вблизи ее краев. По спектру планетарных туманностей мы заключаем, что они состоят из разреженного газа.

§ 199. Светлые диффузные туманности — неправильной, клочковатой формы, с размытыми краями, часто занимают на небе обширные пространства. В этом отношении наиболее замечательна самая яркая из диффузных туманностей — большая туманность Ориона (см. рис. 219). В ясную морозную ночь ее без труда можно видеть в хороший бинокль как слабое белесоватое сияние, окружающее среднюю из трех звездочек, образующих так называемый

меч Ориона, расположенный под тремя звездами, называемыми поясом Ориона. На фотографиях подробности строения туманностей, тонкие детали структуры, волокна, светлые узелки и пр. передаются с такой точностью, которую не в состоянии обеспечить самый лучший художник. На фотографиях видны даже такие туманности, которые совершенно недоступны глазу вследствие их слабого свечения. Чем больше экспозиция при фотографировании туманности Ориона, тем большего размера она получается на фотографии. На фотографии созвездия Ориона, полученной при экспозиции в 40 часов, можно видеть, что наиболее слабая, внешняя часть туманности Ориона далеко выходит за пределы тех 30', на которых ее можно проследить непосредственно в телескоп. Расстояние до нее около 350 парсеков, а размер около 5 парсеков. Встречаются туманности и больших размеров.

Многие диффузные туманности (как, например, туманность Ориона) дают спектр, почти тождественный спектру планетарных туманностей, т. е. состоящий из ярких линий, из чего следует, что они, так же как и планетарные туманности, состоят из разреженного светящегося газа. Другие туманности дают спектр поглощения, тождественный со спектром какой-либо находящейся вблизи них звезды, из чего можно заключить, что они светят отраженным светом этой звезды. Более подробные исследования спектра и света этих туманностей приводят к заключению, что они состоят из твердых тел, которые должны быть небольших размеров, т. е. должны представлять собой скопища метеоритов и мелкой космической пыли (космическая — производное от греческого слова «космос», т. е. Вселенная). Исследования показали, что во всех случаях диффузную туманность можно связать с какой-либо звездой большой светимости, находящейся в пределах области, занятой туманностью, или поблизости от нее. При этом выяснилось, что спектр излучения из ярких линий дают только те туманности, которые находятся по соседству с наиболее горячими звездами (спектральных классов В и О). Во всех же остальных случаях туманность дает спектр такой же, как и погруженная в нее звезда. Массы диффузных туманностей очень разнообразны: от долей массы Солнца до тысяч масс Солнца.

§ 200. Темные диффузные туманности. Как уже говорилось выше, темные туманности вызывают появление темных пятен или полосок на светлом фоне Млечного Пути. На рисунке 223 представлена фотография темной туманности в Змееносце. Легко заметить, что яркие звезды встречаются как перед туманностью, так и в стороне от нее, в то время как слабых звезд на фоне туманности почти совершенно не видно. Так как слабые звезды — это в большинстве случаев далекие от нас звезды, расположенные далее туманности, то, очевидно, их свет, поглощаясь в толще темной туманности, чрезвычайно ослаблен, и сквозь темную туманность мы слабых, т. е. далеких, звезд не видим. В настоящее время установлено, что даже раздвоение полосы Млечного Пути на две ветви, которое на-



Рис. 223. Темная туманность в Змееносце

чинается в созвездии Лебеда и тянется до созвездия Центавра, лишь кажущееся и вызвано тем, что в этом направлении между нами и главной массой звезд Млечного Пути существует особенно большое скопление темных туманностей. В прозрачных участках между темными туманностями возникают, наоборот, «коридоры видимости», в которых видны очень далекие звезды, в частности горячие, образующие поэтому кажущееся сгущение их в некоторых местах неба. В этих коридорах бывают видны и объекты, лежащие вне нашей звездной системы.

Исследования поглощающих и рассеивающих свойств темных туманностей приводят к заключению, что они состоят из крупной и мелкой космической пыли. Крупная пыль поглощает, экранирует общий свет звезд, а мелкая — рассеивает его обратно пропорционально длине волны и тем вызывает его покраснение. *Темные туманности и те светлые диффузные туманности, которые дают непрерывный спектр, одинаково состоят из пыли.*

Большая часть светлых туманностей с непрерывным спектром оказывается связанной с темными туманностями. Вероятно, кроме космической пыли, во всех диффузных туманностях присутствуют и газы, которые лишь при подходящих условиях могут приходить в состояние свечения. Во всяком случае, существуют туманности со спектром, состоящим из ярких линий, накладывающихся на слабый спектр поглощения.

§ 201. Физика газовых туманностей. Для выяснения физической природы газовых туманностей, дающих яркие линии в спектре, чрезвычайно большое значение имела разгадка «небулия». В настоящее время периодическая таблица химических элементов Менделеева окончательно заполнена, так что в ней уже не осталось места для каких-либо элементов, не известных на Земле. Поэтому приписывать происхождение зеленых и некоторых других неотожествленных линий в спектрах туманностей гипотетическим элементам, не известным на Земле, в настоящее время невозможно. В 1927 г., исходя из теории строения атомов и теории излучения ими спектров, было доказано, что линии «небулия» представляют собой так называемые запрещенные линии химических элементов, т. е. линии возможные, но не испускаемые этими элементами в земных условиях.

Таким образом, оказалось, например, что зеленые линии «небулия» являются запрещенными линиями дважды ионизированного кислорода. Так разрешилась загадка «небулия».

Дальнейшие исследования астрофизического характера показали, что источником свечения газовых туманностей являются горячие звезды. В спектрах наиболее горячих звезд чрезвычайно интенсивной является ультрафиолетовая часть спектра, невидимая глазом и обладающая высокой способностью фотоэлектрической ионизации. Когда квант ультрафиолетового света сталкивается с атомом, то атом теряет свой электрон, ионизируется. Свободный электрон через некоторое время, пролетая достаточно

близко от другого ионизированного атома, захватывается им и, падая с орбиты на орбиту, последовательно испускает соответствующие разрешенные линии. В результате такой так называемой фотоэлектрической ионизации атомов, сопровождаемой последующей рекомбинацией, в туманности светится водород, испускающий линии бальмеровской серии, наблюдаемой глазом.

Атомы, испускающие запрещенные линии, светятся под действием иного механизма возбуждения. Электроны, оторванные при



Рис. 224 Темная туманность «лошадиная голова»

ионизации от водорода, сталкиваются с атомами дважды ионизированного кислорода и возбуждают их до метастабильного уровня, т. е. такого, в котором атом способен оставаться очень долго, пока его не беспокоят новым столкновением. Заметим еще, что туманность поглощает невидимый ультрафиолетовый свет звезды, которая этим светом ввиду высокой температуры очень богата. Полученную ею лучистую энергию туманность излучает уже в видимой области спектра, т. е. ее свечение есть флуоресценция. Это объясняет, почему в видимых лучах газовые туманности гораздо ярче, чем звезды, энергию которых они переизлучают.

Описанная теория свечения туманностей позволяет вычислить температуру звезд, возбуждающих свечение газовых туманностей.

Температура ядер планетарных туманностей — самая высокая из известных звездных температур — от 30 000 до 140 000°. Если температура звезды составляет меньше 25 000° (спектральный класс В1 или более поздний), то звезда излучает слишком мало ультрафиолетового света. В этом случае туманность попросту отражает свет звезды, если она состоит не только из газа, но и из космической пыли.

Планетарные туманности имеют массу порядка 0,01 массы Солнца и под действием давления света, излучаемого ядром, расширяются, подобно оболочке новых звезд, но с гораздо меньшей скоростью (порядка 10—30 км/сек). Возможно, что планетарные туманности образуются в результате вспышки звезд, выбрасывающих при этом особенно большие массы газов.

Свечение оболочек новых звезд, описанное в § 194, имеет тот же характер, что и свечение газовых туманностей.

§ 202. Межзвездная среда. Существование межзвездной среды обнаруживается двояко. С одной стороны, наблюдается, что цвет звезд одного и того же спектрального класса, т. е. одинаковой температуры, оказывается тем более красным, чем дальше от нас находится звезда. В то же время можно установить, что такая звезда нам кажется слабее, чем она должна казаться на данном расстоянии. Это показывает, что свет звезды претерпел как общее поглощение, так и избирательное поглощение, подобное поглощению света темной туманностью. Между степенью покраснения звезды и ослаблением ее света существует определенная зависимость: чем больше поглощение света звезды, тем краснее кажется ее цвет по сравнению с цветом, нормальным для ее спектрального класса. Это позволяет по покраснению звезд оценивать, насколько ослаблен поглощением их видимый блеск. Разреженная космическая пыль, скапливающаяся в области темных туманностей, в большей или меньшей степени заполняет и все пространство между звездами.

С другой стороны, в межзвездном пространстве обнаруживается присутствие некоторых атомов вследствие того, что они производят в спектрах звезд появление добавочных темных линий. Среди атомов такого рода, заполняющих межзвездное пространство, легче всего обнаруживается ионизированный кальций. Его присутствие в межзвездном пространстве было обнаружено из наблюдений спектра двойных звезд. Оказалось, что в спектре двойной звезды можно наблюдать тонкие узкие линии ионизированного кальция, которые не меняют своих положений в спектре при смещении всех остальных линий спектра, вызванных орбитальным движением компонентов этой звездной системы.

Из этого вытекает, что кальций не принимает участия в орбитальном движении звезды, а следовательно, не связан с ней, и, по-видимому, расположен в пространстве между нами и двойной звездой. Эти атомы кальция производят поглощение звездного света монохроматически и вызывают появление в спектре соответ-

ствующих темных линий. Позднее было замечено, что тонкие линии кальция присутствуют в спектрах далеких горячих звезд классов В и О, в которых при данной температуре согласно теории ионизации эти линии не должны были бы наблюдаться. Чем дальше от нас находится звезда, тем интенсивнее в ее спектре линия кальция, что можно объяснить лишь тем, что свет более далекой звезды, проходя более длинный путь, пронизывает большую толщу межзвездных паров кальция и сильнее поглощается ими.

Кроме ионизированного кальция, в межзвездном пространстве обнаружено присутствие чрезвычайно разреженных паров натрия, титана и некоторых других элементов.

Космическая пыль, производящая общее поглощение и покраснение света далеких звезд, оказывается наиболее плотной в плоскости симметрии нашей звездной системы — Галактики.

С наличием межзвездной среды и производимым ею поглощением света звезд приходится считаться при изучении строения Вселенной, основанном на подсчете числа звезд различных видимых звездных величин, так как последние этим поглощением света искажаются.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

НАША ГАЛАКТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА И ДРУГИЕ ГАЛАКТИКИ

§ 203. Млечный Путь — так называют молочного оттенка светлую полосу неправильной формы, то суживающуюся, то расширяющуюся и опоясывающую северное и южное небо примерно по большому кругу. Древние наблюдатели называли его *galaxias* (*gala* — по-гречески значит «молоко»), т. е. молочный круг. Уже один из первых философов-материалистов древности, создатель атомистической гипотезы, Демокрит представлял себе Млечный Путь состоящим из бесчисленных мелких звездочек. Галилей при помощи своего несовершенного телескопа впервые убедился в 1610 г. в правильности гениальной догадки Демокрита.

Центральная линия Млечного Пути расположена приблизительно по большому кругу небесной сферы, наклоненному под углом около 62° к небесному экватору. Полюсы этого круга, из которых один имеет склонение $+28^\circ$, а другой — 28° , можно назвать северным и южным полюсами Млечного Пути.

Светлое сияние Млечного Пути происходит главным образом в результате свечения бесчисленного количества слабых звезд. Вильям Гершель поставил и попытался разрешить задачу о строении Млечного Пути на основании статистических подсчетов звезд на различных участках неба. Видя полную невозможность изучить детально все небо, Гершель применил метод «черпков», состоявший в том, что он сосчитывал все звезды, видимые в поле зрения его рефлектора (длиной в 20 футов, т. е. в 6 м), направленного на определенную область звездного неба. Он получил всего 683 числа, характеризующих относительную густоту звезд в различных частях северного неба.

Эти исследования показали с совершенной очевидностью, что в распределении звезд на небе чрезвычайно отчетливо выражена закономерность: если отвлечься от местных неправильностей в распределении звезд, происходящих по различным причинам, то окажется, что звездная плотность, наименьшая у полюсов Млечного Пути, правильно возрастает с приближением к последнему. Из правильного хода полученных им чисел В. Гершель сделал вывод, что все яркие и слабые звезды, доступные его телескопу, образуют единую звездную систему, представляющую собой колос-

сальнейший «звездный диск», сильно сплюснутый у своих полюсов. Длина этого диска по расчетам Гершеля примерно в 5 раз больше его толщины.

Гершель принимал при этом плотность звезд в пространстве одинаковой, а солнечную систему находящейся в центре нашей звездной системы. Однако в дальнейшем выяснилось, что это не так. Звезды действительно концентрируются к плоскости Галактики, но телескопы Гершеля не проникали в наиболее далекие области звездной системы, форму и размеры которой поэтому Гершель правильно определить не мог. Солнце не находится в центре звездной системы. В. Я. Струве указал на существование поглощения света в пространстве, искажающее наши выводы о пространственном распределении звезд, основанные на изучении их видимого распределения. Только в XX в. наука полностью признала справедливость выводов Струве и смогла установить форму и размеры нашей звездной системы с учетом влияния поглощения света в пространстве.

§ 204. Галактические координаты. Через большой круг небесной сферы, расположенный посредине Млечного Пути, можно провести плоскость, называемую *галактической плоскостью*, или *плоскостью Галактики*, т. е. нашей звездной системы. Она играет в звездной астрономии очень важную роль, так как почти при всех исследованиях по звездной статистике положения звезд определяются именно относительно этой плоскости.

На рисунке 225 изображена небесная сфера. Большой круг SQ — небесный экватор. Другой большой круг AB — галактический круг, плоскость которого наклонена к плоскости небесного экватора под углом в 62° . Точки D и D' — северный и южный галактические полюсы (или полюсы Галактики). Экваториальные координаты северного галактического полюса таковы:

$$\alpha = 12^h 40^m \text{ и } \delta = +28^\circ.$$

Для определения положения какой-либо звезды M относительно галактической плоскости проведем через эту звезду и полюс D большой круг (круг широт). Дуга MM' этого круга, измеряющая угловое расстояние звезды M от галактического круга, называется *галактической широтой*. Другая галактическая координата называется *галактической долготой*. Она обычно измеряется дугой галактического круга, отсчитываемой против хода часовой стрелки от одной из точек пересечения этого круга с небесным экватором¹.

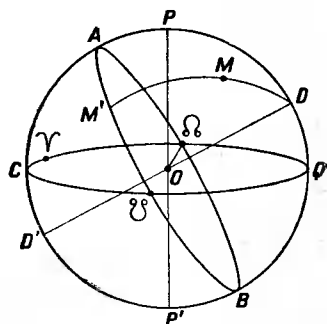


Рис. 225. Галактические координаты

¹ Иногда применяются и другие системы отсчета галактических долгот.

При этом за начало отсчета галактических долгот берется точка Ω (а не Υ), от которой галактическая долгота возрастает в сторону северной полусферы. Общепринято обозначать галактические широты и долготы буквами b и l .

Галактические широты изменяются в пределах от -90° до $+90^\circ$, а галактические долготы — от 0° до 360° . В отличие от экваториальных и эклиптических координат галактические координаты звезд никогда не определяются с большой степенью точности — обычно не точнее, чем до $0^\circ,1$. Это станет вполне понятно, если учесть, что положение галактического полюса в работах различных авторов колеблется в пределах, превышающих 1° . Переход от экваториальных координат к галактическим делается по формулам, сходным с теми, при помощи которых экваториальные координаты преобразовываются в горизонтальные и эклиптические (см. главу II).

Северный галактический полюс находится в созвездии Волос Вероники, южный — в созвездии Скульптора. Нулевая точка отсчета галактических долгот (точка Ω) находится в созвездии Орла. Экваториальные координаты этой точки таковы:

$$\alpha = 18^h 40^m \text{ и } \delta = 0^\circ.$$

§ 205. Галактическая концентрация. На первый взгляд кажется, что яркие звезды разбросаны по небу беспорядочно, образуя на нем разнообразные фигуры созвездий. Однако если подсчитать число ярких звезд около галактической плоскости и на различных галактических широтах, то окажется, что на одинаковых по размеру площадках небесной сферы (например, на площадках по 1 квадратному градусу) число звезд будет резко уменьшаться с удалением от галактической плоскости.

При удалении от галактической плоскости на 20° число ярких звезд уменьшается в $1\frac{1}{2}$ раза, при удалении на 40° — в $2\frac{1}{2}$ раза, а у галактического полюса число ярких звезд меньше, чем около плоскости галактики, в $3\frac{1}{2}$ раза. Эта закономерность носит название *галактической концентрации*, и чем звезды менее яркие, тем сильнее их галактическая концентрация. Степень концентрации характеризуется отношением $N_0 : N_{90}$, где N_0 — число звезд на единицу площади в области галактического экватора, а N_{90} — число звезд в области галактического полюса.

Галактическая концентрация легко может быть объяснена сплюснутостью звездной системы. Если мы подсчитываем на небе звезды некоторой заданной видимой величины (например, от $4^m,0$ до $5^m,0$), то в число этих звезд попадают как звезды, обладающие малой светимостью, но близкие к нам, так и очень яркие, но далекие звезды. Если толщина звездного слоя невелика, последняя категория звезд скоро исчерпывается и число звезд заданной видимой величины окажется меньше, чем для случая звездного слоя большой толщины,

Более детальное рассмотрение этого вопроса приводит к выводу, что галактическая концентрация должна быть тем сильнее выражена, чем меньше блеск рассматриваемой группы звезд. Так оно и оказывается в действительности. В таблице 25 галактическая концентрация измеряется отношением чисел звезд (до определенной видимой фотографической величины) около плоскости Галактики к числу звезд около полюса Галактики.

Таблица 25

Предельная фотографи- ческая величина	Число звезд на 1 квадрат- ный градус		Галактиче- ская концен- трация
	около плоскости Галактики	около полюса Галактики	
5,0	0,045	0,013	3,4
9,0	2,80	0,72	3,9
13,0	146	21,4	6,8
17,0	4780	288	16,6
21,0	73600	1670	44,2

Таким образом, для наиболее слабых звезд, доступных наблюдению, галактическая концентрация достигает огромной величины. В этом, впрочем, нет ничего удивительного, так как именно вследствие обилия слабых звезд около галактической плоскости и получается наблюдаемая на небе картина Млечного Пути (рис. 226).

§ 206. Звездные скопления и их классификация. Одной из характерных особенностей звездной системы являются так называемые звездные скопления, представляющие собой сравнительно небольшие, заметно уплотненные группы звезд.

В 1771 г. французский астроном Мессье составил первый каталог туманностей и звездных скоплений, содержащий всего 103 объекта: из них 61 обнаружен самим Мессье. Обозначение скопления «М34» означает, что это скопление было записано в каталоге Мессье под номером 34.

Существуют два главных подразделения звездных скоплений:

1) *шаровые звездные скопления* и 2) *рассеянные звездные скопления*.

Главнейшая особенность шаровых звездных скоплений — сильная концентрация звезд в центральной части скопления (рис. 227). Как правило, они содержат сотни тысяч звезд.

Рассеянные скопления отличаются неправильной формой и содержат обычно только десятки или сотни звезд, в весьма различной степени концентрирующихся к середине (рис. 228 и 229).

Для обозначения скоплений обыкновенно пользуются номерами или каталога Мессье, или «Нового общего каталога туманностей и звездных скоплений» (NGC). В настоящее время в списке шаровых скоплений числится около ста объектов, а в списке галактических скоплений — около 500 объектов.

§ 207. Шаровые звездные скопления. Для того чтобы уяснить себе связь шаровых и рассеянных скоплений с нашей галактической системой, необходимо знать расстояния до них. Метод определения расстояний до шаровых скоплений основан на оценках



Рис. 226. Часть Млечного Пути в созвездии Стрельца

видимого блеска и периода имеющихся в этих скоплениях переменных звезд — цефеид.

Если абсолютная величина данной цефеиды известна, то для вычисления ее расстояния Δ можно воспользоваться формулой (2), выведенной в § 160.

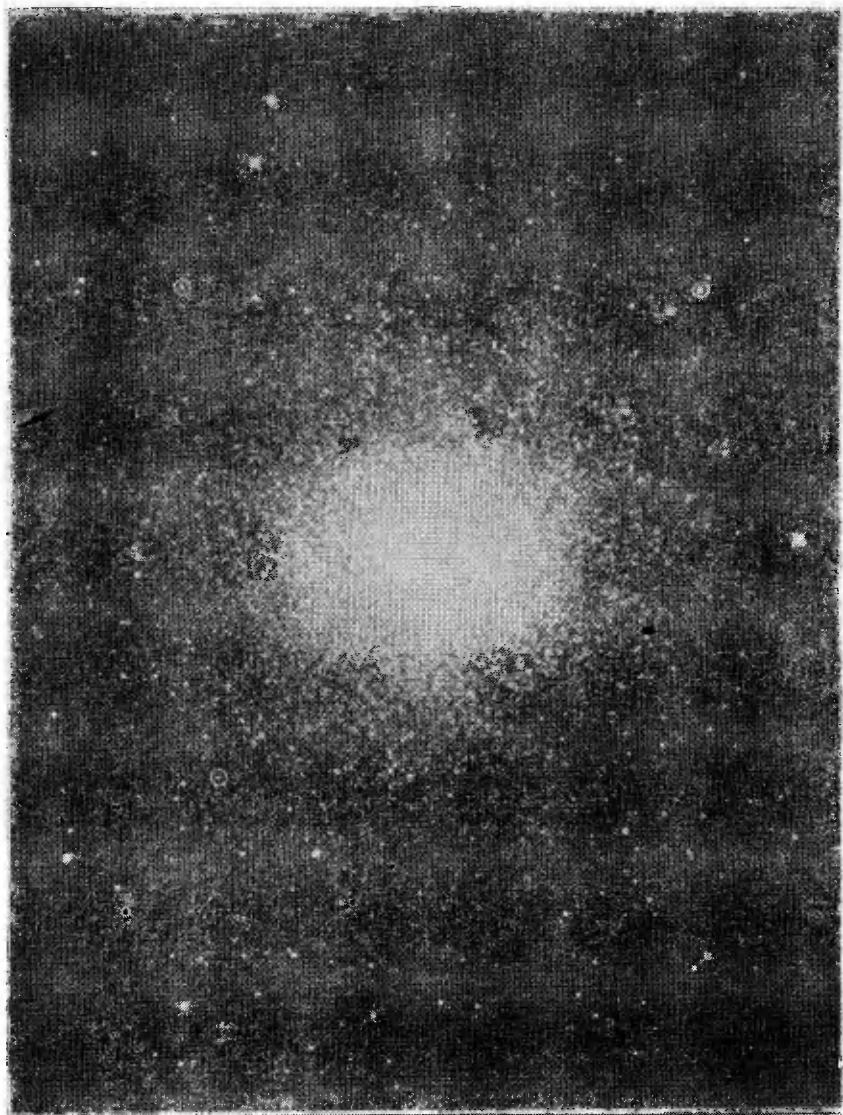


Рис. 227. Шаровое звездное скопление в Геркулесе

Для короткопериодических цефеид (период $< 1^d$), наблюдаемых в шаровых скоплениях, абсолютная величина равна $0^m,0$. Таким образом, для нахождения расстояний короткопериодических цефеид при помощи формулы (2) достаточно определить их видимые величины.

В большинстве случаев, однако, расстояния до шаровых звездных скоплений приходится определять другими способами, дающими менее надежные результаты. Один из таких способов основан



Рис. 228. Плеяды

на постоянстве у некоторых шаровых скоплений разности между средней видимой величиной нескольких наиболее ярких звезд и средней видимой величиной короткопериодических цефеид.

В результате оказывается, что шаровые скопления образуют сферическую систему с центром, практически совпадающим с центром Галактики. Почти все они заключены внутри сферы с радиусом в 20 000 парсеков и, таким образом, находятся внутри Галактики. Диаметры их заключены в пределах 40—100 парсеков.

То обстоятельство, что в непосредственной близости к галактической плоскости шаровые скопления не видны (самая малая галактическая широта шаровых скоплений $2^\circ,3$), объясняется сильным поглощением света близ этой плоскости.

На фотографической пластинке, полученной при помощи 60-дюймового рефлектора с экспозицией в 5 часов, в шаровом скоплении M13 (в Геркулесе) было подсчитано около 35 000 звезд. Подобный же подсчет для M15 (в Пегасе) дал около 29 000 звезд. Однако при самых продолжительных экспозициях на фотоснимках скоплений выходят лишь звезды до 23-й величины; более слабые звезды, которые, несомненно, там находятся, не выходят совсем. Между тем именно слабые звезды составляют основную часть всякого скопления. Ввиду этого оценить полное число звезд какого-нибудь скопления затруднительно, но, по-видимому, масса шарового скопления составляет около миллиона солнечных масс, а число звезд в нем больше миллиона.

§ 208. Рассеянные звездные скопления и звездные ассоциации. Строение рассеянных звездных скоплений совершенно иное, нежели скоплений шаровых. Прежде всего надо отметить, что все

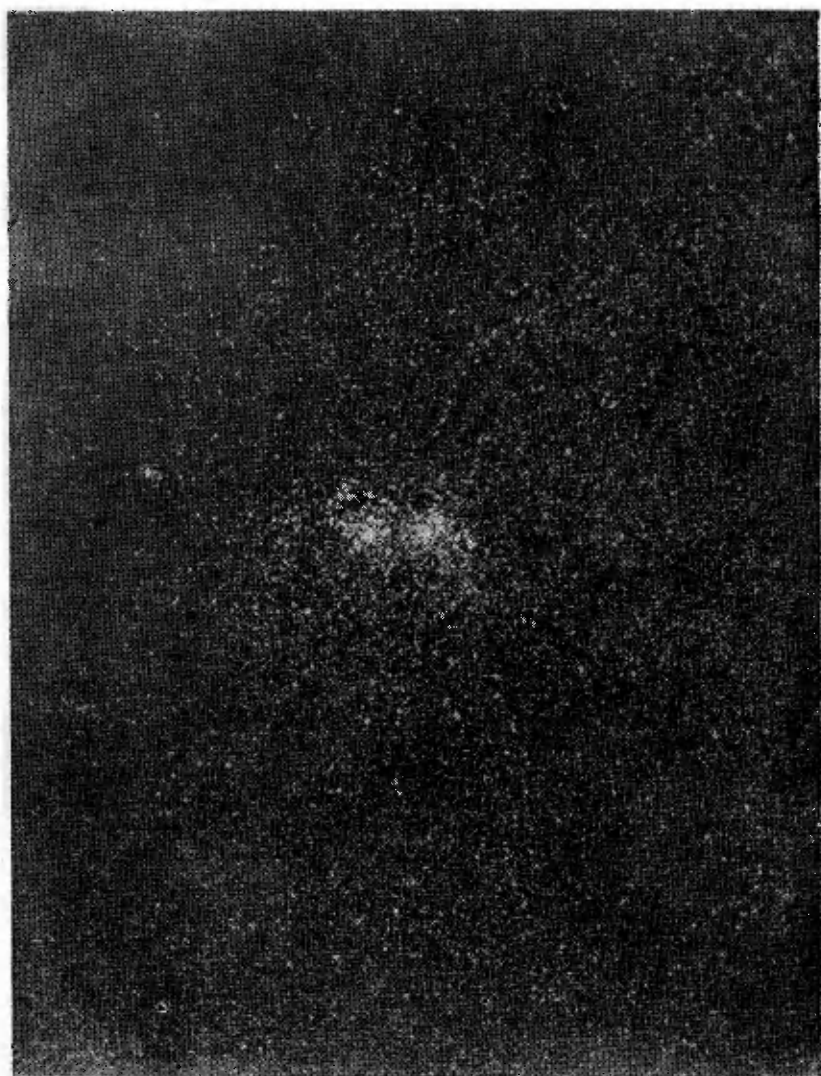


Рис. 229. Рассеянные звездные скопления χ и η в Персее

рассеянные скопления крайне бедны звездами: число звезд, составляющих эти скопления, незначительно и доходит только до нескольких десятков или сотен. Далее, очертания рассеянных скоплений крайне неопределенны; для того чтобы выделить эти звездные скопления из числа других звезд, приходится прибегать к сопоставлению спектров составляющих их звезд и к изучению собственных движений последних.

К рассеянным скоплениям относятся и так называемые *движущиеся скопления* и *местные звездные потоки*. Потоки Гиад, Большой Медведицы, Персея и Скорпиона состоят из звезд, движущихся в каждой из этих групп приблизительно по параллельным траекториям и с одинаковыми скоростями.

В среднем диаметры рассеянных скоплений составляют всего несколько парсеков и лишь в исключительных случаях превышают 20 парсеков, доходя до 60 парсеков. Расстояния от нас до известных рассеянных скоплений значительно меньше, чем расстояния до шаровых скоплений. Все рассеянные скопления имеют вполне отчетливо выраженную видимую концентрацию к Млечному Пути, а в пространстве они сильно концентрируются к плос-

Таблица 26

Звездное скопление	Расстояние в парсеках	Средний диаметр в парсеках
Плеяды	140	13
Ясли	170	4
Мессье 7	250	4
χ и η Персея (двойное)	1900	25
Мессье 11	1100	10

кости Галактики. Расстояния их можно установить с достаточной точностью, определяя параллаксы составляющих их звезд различными методами. Некоторые из этих расстояний приведены в таблице 26. В. А. Амбарцумян обнаружил, что в некоторых местах пространства встречаются сгущения однотипных звезд, однако настолько разреженные, что составляющие их звезды слабо связаны тяготением, но, вероятно, возникли

совместно и в прошлом были ближе друг к другу. Такие сгущивания однотипных звезд называются *звездными ассоциациями*.

Все рассеянные скопления входят в состав той колоссальной системы звезд, которую мы называем Галактикой.

§ 209. Наша звездная система — Галактика. Для исследования строения и определения размеров нашей звездной системы, названной Галактикой, на разных участках неба подсчитывают число звезд различного видимого блеска. Зная распределение числа звезд по разным светимостям в единице объема в окрестностях солнечной системы и предполагая его таким же и дальше, можно вычислить пространственное распределение звезд. При этом необходимо учитывать поглощение света в пространстве, ослабляющее видимый блеск звезд тем сильнее, чем они дальше.

Более точные результаты дает подсчет звезд различных спектральных классов и видимого блеска, особенно если при этом определяется и степень покраснения каждой звезды, так как величина покраснения ее против нормального цвета для данного спектрального класса позволяет точнее определить, насколько ее блеск ослаблен межзвездным поглощением света. Однако все такие исследования могут охватить лишь ближайшие окрестности солнечной системы, так как массовые определения спектральных классов звезд доступны пока только до 12-й звездной величины. Звезды же такой светимости, как Солнце, с учетом поглощения света, выглядят как звезды 12-й звездной величины на расстоянии всего лишь около сотни парсеков.

Более интересные, хотя и менее полные, данные получаются путем изучения распределения звезд определенных типов, имеющих большую светимость и потому видимых до гораздо больших расстояний. Такими звездами являются гиганты, в частности горячие гиганты классов О и В, а также новые и переменные звезды и газовые туманности. Для них уверенно известна их светимость, с особенной точностью — для цефеид и долгопериодических переменных звезд. Светимости этих звезд строго соответствуют периодам изменения их блеска, легко устанавливаемым из наблюдений даже тогда, когда переменная звезда близка к пределу видимости. Именно изучение таких звезд, а также звездных скоплений позволило установить границы галактической системы и основные черты ее структуры. Цефеиды в направлениях, более свободных от поглощающей свет космической пыли, удалось обнаружить на расстояниях, превышающих 10 000 парсеков и находящихся в периферийных областях нашей звездной системы.

Исследования Бааде (США) и Б. В. Кукаркина (СССР) и других астрономов показали, что различные типы звезд имеют различное распределение в Галактике, распадаясь на три типа подсистем: плоские, сферические и промежуточные. Звезды плоских подсистем очень сильно концентрируются к плоскости Галактики, но слабо — к ее центру. Плоские подсистемы образуют долгопериодические цефеиды, горячие гиганты, рассеянные звездные скопления, все диффузные туманности и межзвездная среда. Сферические подсистемы образуют короткопериодические цефеиды и шаровые звездные скопления. Они не обнаруживают или почти не обнаруживают концентрации к плоскости Галактики, но обнаруживают сильную концентрацию к центру Галактики. Они заполняют сферические или эллипсоидальные объемы и распространяются поэтому над плоскостью Галактики гораздо дальше, чем звезды плоских подсистем, сжатых к этой плоскости. Звезды промежуточных подсистем (планетарные туманности, долгопериодические переменные и др.) распределены так, что образуют подсистемы, промежуточные между сферическими и плоскими.

Звезды различных подсистем различаются характеристиками своих движений. Особенно характерно, что звезды сферических

подсистем, например короткопериодические цефеиды, имеют большие и беспорядочно направленные скорости, а звезды плоских подсистем движутся с меньшими скоростями и преимущественно в плоскости Галактики, описывая орбиты около ее центра.

Таким образом, Галактику можно себе представить как сложную систему, состоящую из ряда взаимно проникающих подсистем, обладающих различными кинематическими особенностями.

В Галактике существует эллипсоидальное ядро, состоящее из звезд-субкарликов и большого числа короткопериодических цефеид. Звезд-гигантов в ядре нет, и, вероятно, нет в нем или имеется

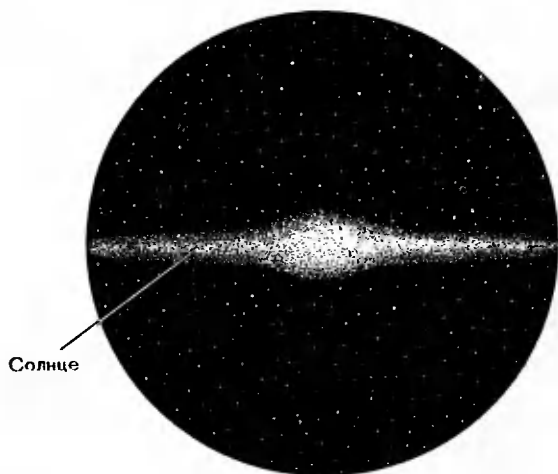


Рис. 230. Схема Галактики «сбоку» (наблюдатель находится в галактической плоскости)

мало диффузной материи. Во все стороны от ядра в виде гигантской разреженной атмосферы его простираются сферические подсистемы, состоящие из таких же звезд, как и само ядро, и из шаровых скоплений, пространственная плотность которых быстро падает к периферии. Наряду с этим звезды-гиганты и вся диффузная материя расположены в узком галактическом слое толщиной всего в несколько сот парсеков, причем толщина этого слоя к центру Галактики увеличивается, так что он представляет собой нечто вроде эллипсоида с отношением осей около 1 : 10. Радиус Галактики составляет около 13 000 парсеков, а диаметр около 26 000 парсеков, т. е. около 85 000 световых лет¹. Солнце находится на расстоянии около десятка парсеков от плоскости симметрии Галактики, — от галактической плоскости и несколько ближе к ее периферии, чем к центру (рис. 230). Центр Галактики находится

¹ Эти числа несколько условны, так как у Галактики резких границ нет.

Таблица II



Большая галактика в созвездии Андромеды (М 31)

у галактической долготы — 330° и видим от нас в направлении созвездия Стрельца. Однако ядра Галактики непосредственно не видно, так как оно скрыто от нас облаками космической пыли. Только южный край его виден частично и в нем на расстоянии, равном расстоянию Солнца от галактического ядра, обнаружено множество короткопериодических цефеид, входящих в состав этого ядра. Ядро Галактики удалось сфотографировать в инфракрасных лучах, менее поглощаемых космической пылью, нежели видимые длины волн. В направлении, противоположном направлению к центру Галактики, в видимых у нас зимой созвездиях Возничего, Близнецов и Единорога Млечный Путь не ярок, так как в этом направлении плоский слой звезд кончается ближе к нам и число звезд на луче зрения невелико: на расстоянии около 6000 парсеков Галактика сходит на нет, переходя в так называемое внегалактическое пространство.

Вблизи плоскости Галактики звезды разных типов и туманности распределены очень неравномерно. Они сгущаются в звездные облака, имеющие размер порядка сотен парсеков. Эти облака и соприкасаются, и встречаются изолированно, будучи погружены в межзвездную среду, состоящую из пыли и газа, среду неравномерной плотности и местами сконцентрированную в газовые и пылевые туманности. Рассеянные звездные скопления находятся преимущественно в составе звездных облаков.

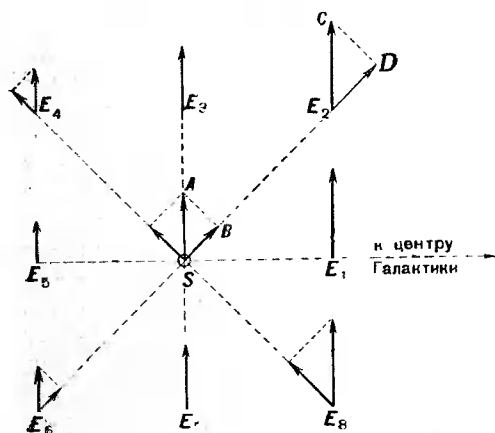
По-видимому, одним из таких звездных облаков размером около 250×500 парсеков является так называемая *Местная система*. В ее состав входят более близкие к нам и потому яркие звезды типа В, а также, вероятно, множество других звезд и в том числе наше Солнце. Вытянутость Местной системы направлена от 60° к 240° галактической долготы.

Весьма вероятно, что плоские подсистемы Галактики в виде совокупности звездных облаков образуют спиральную систему. Спиральные ветви, выходящие из ядра Галактики, закручиваются вокруг него и представляют собой цепи звездных облаков.

Клочковатая видимая структура Млечного Пути с яркими звездными областями и темными участками обусловлена отчасти проектированием друг на друга звездных облаков и составленных ими спиральных ветвей, отчасти экранированием их темными туманностями, подобными так называемым «угольным мешкам» в созвездиях Южного Креста и Лебедя. Между ними возникают более прозрачные области — «коридоры видимости», в которых мы можем наблюдать звезды на далеком расстоянии. В некоторых из них видны даже звездные образования, лежащие далеко за пределами нашей Галактики.

§ 210. Вращение Галактики. Движение каждой из звезд нашей звездной системы должно, очевидно, подчиняться закону всемирного тяготения, завися от притяжения совокупности всех остальных звезд Галактики.

Если бы основная часть массы звездной системы была расположена в ее центре, так что взаимное притяжение остальных звезд имело бы второстепенное значение, то движение звезд было бы подобно движению планет в солнечной системе, происходящему по законам Кеплера. Но если бы пространственная звездная плотность внутри всей звездной системы была приблизительно постоянна, то вращение звездной системы должно было бы быть подобным вращению твердого тела: орбитальные скорости звезд были бы прямо пропорциональны расстояниям звезд от центра системы.



Которое из двух предположений более близко к действительности, выяснить нелегко. Имеющийся в настоящее время наблюдательный материал, по-видимому, показывает, что движение звезд в большей степени подчиняется

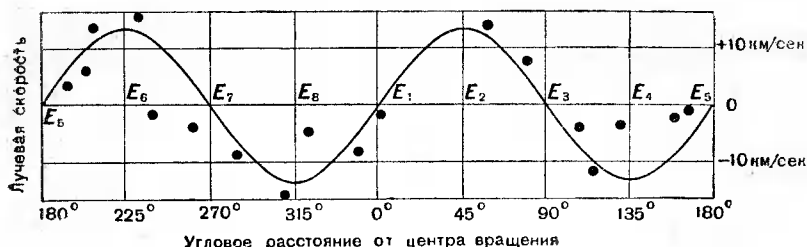


Рис. 231. Влияние вращения Галактики на лучевые скорости звезд

законам Кеплера, чем законам вращения твердого тела. В таком случае, чем ближе находится к центру системы какая-либо звезда, тем большей орбитальной скоростью она должна обладать.

Предположим (рис. 231), что Солнце S и окружающие его звезды $E_1, E_2, \dots, E_8$ участвуют во вращении Галактики, двигаясь по круговым орбитам вокруг центра этого вращения. При этом звезды E_3 и E_7 отстоят от центра вращения Галактики на таком же расстоянии, как Солнце. Звезды же E_1, E_2 и E_8 находятся на меньшем расстоянии, а звезды E_6, E_5 и E_4 — на большем расстоянии от центра вращения Галактики, чем Солнце (на рис. 231 направление к центру вращения Галактики указано прерывистой горизонталь-

ной стрелкой). При этом предполагается, что расстояние до центра вращения Галактики очень велико по сравнению с расстоянием Солнца до звезд, изображенных на рисунке.

У звезд E_2 , E_1 и E_8 , находящихся ближе к центру вращения Галактики, чем Солнце, орбитальные скорости больше солнечной, изображенной вектором SA . У звезд E_3 и E_7 скорости, равные скорости Солнца, и, наконец, у звезд E_4 , E_5 и E_6 скорости меньше, чем у Солнца.

Из рисунка 231 нетрудно понять, что лучевые скорости звезд E_1 , E_3 , E_5 и E_7 , измеренные наблюдателем, движущимся вместе с Солнцем, окажутся равными нулю. У остальных же звезд, изображенных на рисунке 231, лучевые скорости будут отличными от нуля.

В качестве примера рассмотрим звезду E_2 . Проведем линию E_2S , соединяющую звезду E_2 с Солнцем, и спроектируем на эту линию орбитальные скорости E_2C и SA звезды и Солнца. Тогда лучевая скорость звезды E_2 относительно Солнца получится как разность проекции E_2D и SB . Она окажется положительной, так как $SB < E_2D$ и звезда E_2 по лучу зрения будет удаляться от Солнца.

Подобным же образом можно доказать, что и звезда E_6 будет иметь положительную лучевую скорость относительно Солнца; звезды же E_4 и E_8 будут иметь относительно Солнца отрицательные лучевые скорости, т. е. будут приближаться к Солнцу по лучу зрения.

Рисунок 231 — схематический. В действительности звезды, окружающие Солнце, имеют скорости, величины и направления которых зависят не только от расстояния до центра вращения Галактики, но и от направления к этому центру. Однако если вместо отдельных звезд рассматривать достаточно многочисленные группы звезд, то средние скорости этих групп окажутся очень сходными со звездными скоростями, изображенными на рисунке 231.

Таким образом, если действительно Солнце и окружающие его звезды участвуют во вращении Галактики, средняя лучевая скорость звезд должна быть функцией галактической долготы, четыре раза проходящей через нуль при изменении l от 0° до 360° .

Теоретическое рассмотрение вопроса привело к выводу следующей формулы:

$$v_r = \Delta A \sin 2(l - l_0), \quad (3)$$

где v_r — лучевая скорость группы звезд (исправленная за движение Солнца относительно близлежащих к нему звезд, см. § 158), Δ — среднее расстояние этой группы от Солнца, A — постоянная, зависящая от скорости движения Солнца вокруг центра вращения Галактики и от расстояния Солнца до этого центра; l и l_0 — галактические долготы группы звезд и центра галактического вращения. На рисунке 231 точки представляют средние наблюдаемые лучевые скорости, и их разброс по отношению к синусоиде, вероятно, вызван недостаточной точностью, с которой известно A .

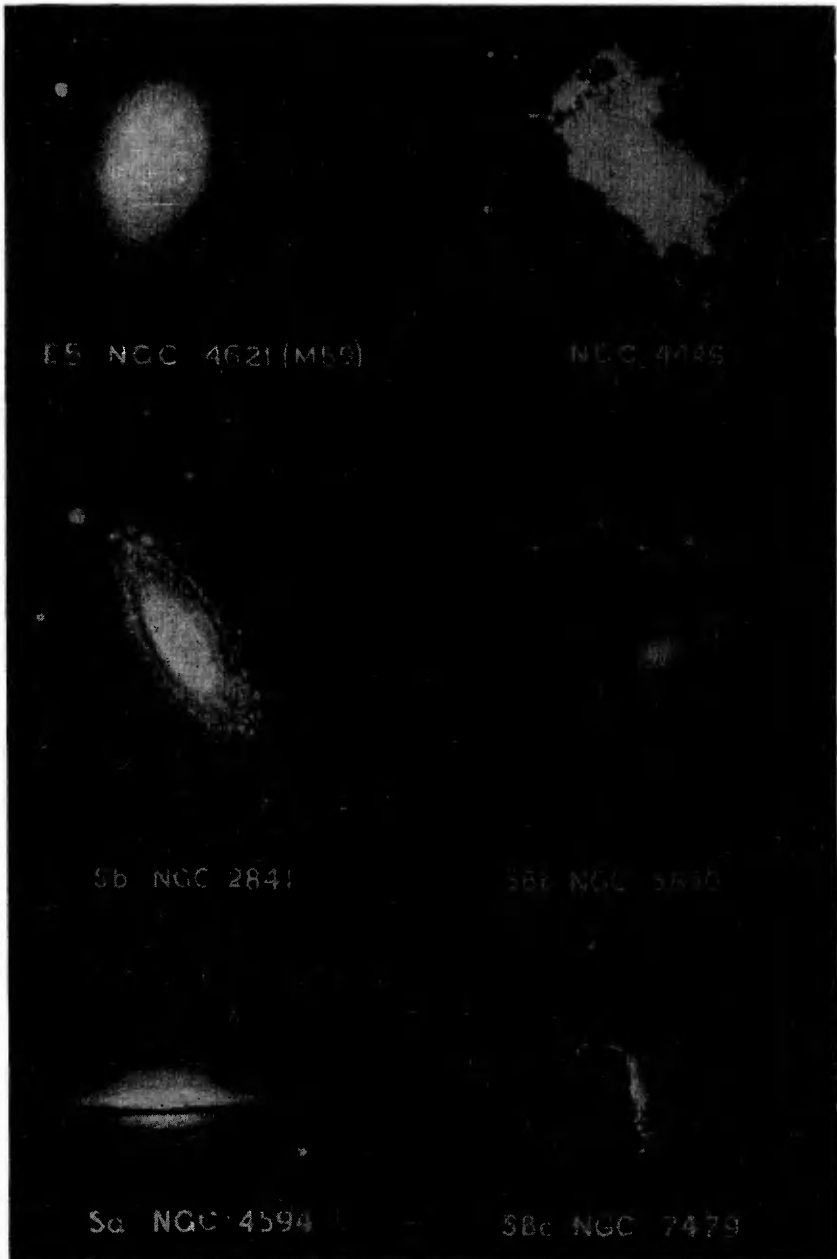
Формула (3) вполне подтверждает сделанные нами выводы относительно лучевых скоростей звезд, окружающих Солнце. В самом деле, скорость v , делается равной нулю при четырех значениях: $l : l_0, l_0 + 90^\circ, l_0 + 180^\circ$ и $l_0 + 270^\circ$. Промежуточные значения v , внутри интервалов от l_0 до $l_0 + 90^\circ$ и от $l_0 + 180^\circ$ до $l_0 + 270^\circ$ — положительные, а внутри интервалов от $l_0 + 90^\circ$ до $l_0 + 180^\circ$ и от $l_0 + 270^\circ$ до l_0 — отрицательные.

Исследования лучевых скоростей звезд убедительно подтвердили эти выводы, как и всю гипотезу о вращении Галактики. При этом было получено направление к центру вращения Галактики, соответствующее галактической долготе $l_0 = 325^\circ$. Аналогичные исследования собственных движений звезд привели к чрезвычайно близкому результату.

Полученное направление практически совпадает с направлением к центру Галактики, найденным по распределению слабых звезд, и с направлением к центру системы шаровых скоплений.

Надежность всех этих результатов обработки разнообразного наблюдательного материала получила в 1950 г. очень важное подтверждение. В. Б. Никонов, В. И. Красовский и А. А. Калинин в Крымской астрофизической обсерватории впервые сфотографировали в инфракрасных лучах центральное ядро Галактики, находящееся в направлении созвездия Стрельца (рис. 226). Оно должно было бы представляться как наиболее яркое пятно в Млечном Пути. Однако этого не наблюдается вследствие того, что между ним и нами находится толстый слой облаков космической пыли, поглощающих свет звезд, расположенных в них, а особенно за ними. Поэтому в направлении на самый центр Галактики яркость Млечного Пути невелика. Но инфракрасные лучи поглощаются межзвездной пылью гораздо слабее, чем лучи видимого света. Учитывая это, названные советские ученые и применили свою новую методику. На их фотографии участок Млечного Пути в направлении к центру Галактики, казавшийся темным на обычных фотографиях, оказался заполненным светлым звездным облаком. Последнее наиболее ярко именно в направлении на самый центр Галактики, и, по-видимому, это светлое облако и есть не что иное, как центральная часть ядра нашей Галактики. Это ядро имеет более 1000 парсеков в диаметре и почти шарообразно. Оно состоит почти исключительно из звезд так называемых сферических подсистем; в частности, в него входит много короткопериодических цефеид. Эти очень далекие от нас цефеиды обнаружены в большом числе непосредственно вблизи того направления на галактический центр, где облака космической пыли более разрежены.

Направление галактического вращения Солнца и ближайших к нему звезд, очевидно, должно отличаться на 90° от направления к центру вращения Галактики и соответствовать галактической долготе 60° (так как галактическое вращение происходит по ходу часовой стрелки для наблюдателя, смотрящего со стороны северного полюса Галактики).



Различные типы галактик



Галактика в созвездии Гончих Псов (NGC 5194)



Галактика в созвездии Волос Вероники (NGC 5195)



Большое Магелланово Облако



Волокнистая светлая туманность и темная пылевая туманность (фотография, сделанная в Горной обсерватории Академии наук Казахской ССР)

Таким образом, Солнце, или, вернее, солнечная система, имеет два движения: одно в направлении созвездия Геркулеса со скоростью 20 км/сек — это движение Солнца относительно группы близлежащих к нему звезд; другое — в направлении созвездия Цефея ($b = 0^\circ, l = 55^\circ$) со скоростью порядка 250 км/сек — это движение Солнца относительно центра Галактики вместе с группой близлежащих к Солнцу звезд.

Если взять среднее из значений постоянной A , входящей в формулу (3) и многократно определенной из обработки наблюдательного материала различными авторами, и принять расстояние до центра Галактики равным 7200 парсеков (см. § 209), можно определить орбитальную скорость Солнца. Она получается около 230 км/сек, что соответствует периоду обращения Солнца вокруг галактического центра примерно за 190 млн. лет. Таким образом, за время существования нашей Земли Солнце должно было обойти вокруг центра Галактики по меньшей мере раз десять.

Межзвездный газ принимает участие во вращении Галактики. За последнее время стало возможным исследовать радиоизлучение межзвездного газа, находящегося от нас на гораздо больших расстояниях, чем те звезды, положения и движения которых в пространстве нам известны. Это открывает совершенно новые возможности для изучения распределения и движения в Галактике межзвездного газа, для изучения вращения Галактики во всей ее толще.

§ 211. Галактики. Все те туманности, которые находятся вне пределов нашей Галактики, получили название *внегалактических туманностей*, или *галактик*, так как они оказались звездными системами, подобными нашей Галактике. По мере приближения к галактической плоскости подобные галактики видны на небе все реже и реже. Это объясняется, очевидно, тем, что все эти галактики лежат далеко за пределами нашей Галактики, и темные пылевые туманности, расположенные в экваториальной плоскости Галактики, мешают нам видеть внегалактические объекты сквозь эти пылевые образования. Все же несколько галактик было открыто в самом поясе Млечного Пути в созвездии Ориона в направлении, диаметрально противоположном направлению к центру Млечного Пути. Очевидно, это объясняется тем, что в указанном направлении имеется как бы «просвет», т. е. область, почти совершенно лишенная пылевой, поглощающей свет материи. Были открыты еще и другие подобные же «просветы» и коридоры в окружающее нас внегалактическое пространство. Во всех этих коридорах было насчитано несколько сот галактик. Таким образом, мы можем утверждать, что другие галактики окружают нашу Галактику со всех сторон.

Галактики имеют непрерывные спектры с темными линиями поглощения, как у звезд. Отсюда можно сделать заключение, что они состоят из звезд.

Все галактики разделяются по их видимой форме на *эллиптические*, *спиральные* и *неправильные*.

Яркость их всех наибольшая в центре. Представляющаяся нам шарообразной галактика в действительности может быть и сплюснутой, но расположенной к нам по направлению своей малой оси. У спиральных галактик, которые бывают расположены к нам по направлению малой оси (например, в созвездии Гончих Псов — таблица IV) и под углом к ней (например, в созвездии Андромеды — таблица II) и по направлению большой оси (например, в созвездии Волос Вероники — таблица IX), обыкновенно от средней наиболее яркой части отходят две-три ветви, с противоположных концов, спиралью закручивающиеся вокруг нее. Когда мы смотрим на галактику как бы с ребра, то она нам кажется веретенообразной.

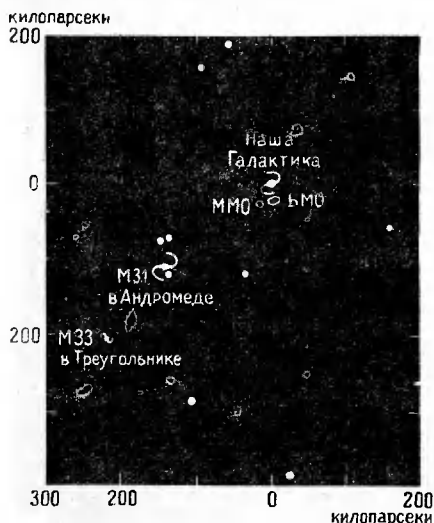


Рис. 232. Схема местной системы галактик

В 1925—1926 гг. краевые области двух спиральных галактик М33 (в Треугольнике; рис. 233) и М31 (в Андромеде; табл. II) удалось разложить на отдельные звезды. Эти звезды, среди которых было открыто много переменных (цефеид), оказались в среднем очень слабыми: 18—19-й звездной величины.

Это дало возможность определить периоды изменений блеска цефеид и вычислить расстояния до галактик. В некоторых галактиках наблюдались новые звезды. По ним можно оценивать расстояния,

исходя из того, что у всех новых, как и в нашей Галактике, абсолютные звездные величины одинаковы. Таким образом, найдено расстояние до спиральной галактики в созвездии Андромеды около 750 000 световых лет, или около 230 000 парсеков. По расстоянию и угловому диаметру определены и действительные размеры, которые у этой галактики оказались того же порядка, что и у нашей Галактики.

Внутри нее были открыты туманности с газовыми спектрами, напоминающие рассеянные газовые туманности в нашей Галактике, а также неправильные и шаровые звездные скопления (в спирали М31 — около 140 шаровых звездных скоплений). Газовые и пылевые туманности расположены в экваториальной плоскости галактик. Когда галактика повернута к нам этой плоскостью (ребром), то скопление темных туманностей, поглощая свет внутренних частей, представляется как темная полоса вдоль плоскости экватора галактики.



Рис. 233. Галактика в созвездии Треугольника (М33)

В 1944 г. удалось разложить ядра некоторых спиральных галактик и некоторые эллиптические туманности на отдельные звезды, например M31, M32 и др. Всего ближе к нашей Галактике расположены два сравнительно небольших звездных коллектива, по своей форме относящиеся к неправильным и являющиеся как бы спутниками нашей Галактики. Это — Большое Магелланово Облако (на расстоянии от Солнца около 70 000 световых лет) и Малое

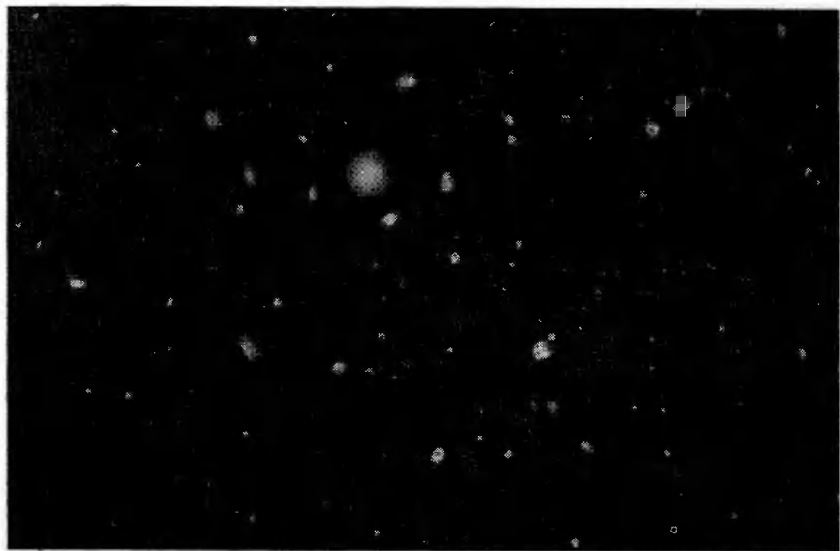


Рис. 234. Скопление галактик в созвездии Волос Вероники

Магелланово Облако (на расстоянии от Солнца около 80 000 световых лет). На небе они наблюдаются среди созвездий южного небесного полушария (таблица V).

Можно подойти к приблизительному сравнению расстояний по видимому блеску галактик, принимая примерно одинаковыми их светимости. Этот способ весьма приближенный, так сказать, статистический характер. Но на фотографиях обнаружены уже сотни тысяч галактик, весьма разнообразных по своим угловым размерам и видимым яркостям. Сравнение большого количества их дает общее представление о расстояниях до них, которые определяются от сотен тысяч до сотен миллионов световых лет.

В отдельных местах на небе встречаются близкие одна к другой галактики, составляющие как бы группы их и целые скопления, в которых насчитываются десятки и сотни отдельных галактик. Если считать, что и в пространстве они группируются сравнительно близко одна к другой, то в них мы имеем новые более сложные коллективы (рис. 234).

Так же как и в нашей Галактике, звезды, составляющие другие галактики, находятся в движении. На основании исследования спектров наиболее ярких галактик обнаружено их вращение и общее их поступательное движение.

§ 212. Смещение линий в спектрах галактик и критика идеалистической трактовки этого явления. Когда в 1929 г. была составлена сводка всех известных в то время лучевых скоростей галактик, то оказалось, что все эти скорости — положительные, за исключением скоростей только трех ближайших к нам галактик. Это явление получило наименование «красного смещения», так как спектральные линии у всех галактик оказываются сдвинутыми к красному концу спектра, что (если применять здесь принцип Доплера — Физо) свидетельствует об удалении от нас галактик. Был составлен график, на котором по горизонтальной оси откладывались расстояния в миллионах парсеков, т. е. в мегапарсеках, а по вертикальной оси — лучевые скорости галактик в километрах в секунду. Оказалось, что лучевые скорости v в километрах приблизительно связаны с их расстояниями Δ в мегапарсеках соотношением вида:

$$v = K\Delta,$$

где постоянная K по современным данным составляет около 180. Указанное соотношение позволяет приблизительно определять расстояния до галактик.

Таблица 27 содержит некоторые из этих расстояний, а также значения лучевых скоростей. Из нее можно видеть, что эти скорости быстро растут с расстоянием.

Таблица 27

В каком созвездии находится	Число галактик в скоплении	Расстояние в млн. световых лет	Средняя лучевая скорость в км/сек
Дева	(500)	6	+ 890
Пегас	100	24	+ 3810
Рыбы	20	23	+ 4630
Рак	150	29	+ 4820
Персей	500	36	+ 5200
Волосы Вероники	800	45	+ 7500
Большая Медведица	300	72	+ 11800
Лев	400	105	+ 19300
Близнецы	(300)	135	+ 23500

Получающиеся таким образом лучевые скорости далеких галактик оказываются колоссальными. Галактики как бы разбегаются во все стороны и с тем большими скоростями, чем они дальше от нас. За подобные выводы ухватились некоторые буржуазные ученые и используют их для ряда идеалистических построений. Они переносят это «разбегание» на всю Вселенную в целом.

Учение о мире в целом обычно называют *космологией*, которая рассматривает на основе физических и астрономических данных вопросы взаимосвязи пространства, времени и распределения материи. Вопросами космологии, в частности, занимался Эйнштейн. Исходя из некоторых упрощенных предпосылок на основании теории относительности, он пришел к выводу, что Вселенную можно признать «конечной» (при некоторых ограничительных предположениях). Эйнштейн дал даже формулу для вычисления «радиуса мира».

Этот вывод является произвольным, абстрактно полученным при определенных ограничительных предположениях в математических уравнениях, которые не имеют отношения к реальному миру.

Трактую «красное смещение» как разбегание галактик, идеалисты стали создавать теории расширяющейся Вселенной. Некоторые из них утверждают, что в какой-то начальный момент все галактики вышли из какого-то одного общего центра, и уже совершенно серьезно обсуждают вопрос об этом начальном моменте как акте творения и дате этого творения.

Все эти построения исходят из толкования «красного смещения» спектральных линий как доплеровского, которое получено из наблюдений сравнительно близких к нам источников света. Но от внегалактических туманностей свет идет к нам миллионы, десятки и сотни миллионов лет, проходя колоссальные пространства в различных условиях, которые нам совершенно неизвестны. Несомненно, здесь могут происходить разнообразные изменения электромагнитных волн, которые при меньших расстояниях и за более короткое время при наблюдении нами более близких объектов могут быть совершенно незаметны и накапливаются тем в большей степени, чем большее пространство приходится проходить лучам. Нам теперь известны и другие факторы, вызывающие смещение спектральных линий и покраснение, помимо доплеровского, например наличие в области источника света особо сильного поля тяготения. Наука, несомненно, дальнейшими исследованиями выяснит истинные физические причины, вызывающие «красное смещение». Поэтому вся эта теория расширяющейся Вселенной из какого-то начального маленького объема, начиная с «момента творения», является произвольным построением и рухнет вместе с отпадением исходного толкования.

Но если бы действительно существовало такое движение окружающих нас галактик¹, хотя и в весьма обширной, но ограниченной части Вселенной, относить это ко всей бесконечной Вселенной совершенно неправомерно. Одним из основных пороков всех идеалистических теорий в физике и в космологии является абсолютизация выводов, относящихся к конкретным конечным областям Вселенной, и перенесение их на всю Вселенную.

¹ В последнее время существование «разбегания» галактик получило подтверждение при изучении их радиоизлучения.

Хорошо об этом сказал А. А. Жданов в своем выступлении в 1947 г. на дискуссии по книге Г. Ф. Александрова «История западноевропейской философии»:

«Современная буржуазная наука снабжает поповщину, фидеизм новой аргументацией, которую необходимо беспощадно разоблачать... Не понимая диалектического хода познания, соотношения абсолютной и относительной истины, многие последователи Эйнштейна, перенося результаты исследования законов движения конечной, ограниченной области вселенной на всю бесконечную вселенную, договариваются до конечности мира, до ограниченности его во времени и пространстве, а астроном Милн даже «подсчитал», что мир создан 2 миллиарда лет тому назад. К этим английским ученым применимы, пожалуй, слова их великого соотечественника, философа Бэкона о том, что они обращают бессилие своей науки в клевету против природы».

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

КОСМОГОНΙΑ

§ 213. Возраст Земли, Солнца и звезд. Точнее всего может быть установлен возраст не Земли в целом, а земной коры, т. е. время, протекшее от эпохи ее образования на поверхности земного шара до настоящего времени. Уже оценка скорости образования осадочных горных пород (на дне морей в результате наслоения частиц, приносимых реками) показывает, что их возраст исчисляется десятками миллионов лет. Более точные результаты дает анализ горных пород, содержащих радиоактивные элементы. Распад радиоактивных элементов, сопровождающийся выделением гелия и приводящий к образованию свинца, происходит независимо от внешних условий. Скорость распада такова, что из N первоначально имевшихся атомов радиоактивного элемента по прошествии t лет образуется $N(1 - e^{-\lambda t})$ атомов свинца, где λ — коэффициент, различный для разных элементов.

Если мы возьмем горную породу, содержащую уран, то мы должны считать, что его распад начался с эпохи выкристаллизовывания данной породы при образовании твердой земной коры на остывающем земном шаре. Продукт распада урана — свинец — остается заключенным в породе и накапливается в ней по мере распада урана. Атомный вес урана 238, а атомный вес свинца, получающегося при распаде урана, — 206. Очевидно, определив в 1 г породы содержание урана и свинца, мы можем написать:

$$\frac{\text{вес уранового свинца}}{\text{вес урана}} = \frac{206(1 - e^{-\lambda t})}{238e^{-\lambda t}}.$$

Зная из лабораторных исследований λ для урана, мы можем из написанного уравнения найти t , т. е. время, в течение которого в минерале накопился найденный в нем свинец, иначе говоря, возраст данной горной породы. Оказывается, что древнейшие горные породы сформировались около $3 \cdot 10^9$, т. е. около трех миллиардов лет назад. Таким образом, $3 \cdot 10^9$ лет является нижним пределом возраста Солнца.

Возраст звезд как время, в течение которого они существуют в качестве раскаленных, самосветящихся тел, может быть оценен,

исходя из ряда соображений, основанных на анализе наблюдаемых фактов.

Некоторые способы подсчета приводили к значению 10^9 лет для возраста звезд. Так как это близко к оценке возраста земной коры, то многие ученые капиталистического мира поспешили сделать лженаучный вывод, будто и Земля и звезды возникли одновременно около 10^9 лет назад. Этим они хотели дать как бы «научное подтверждение» библейской легенде о сотворении звезд и Земли в течение короткого времени («в 6 дней»).

Советская наука опровергла эти реакционные рассуждения и, изучая факты, установила, что даже в нашей звездной системе — Галактике — разные звезды и разные подсистемы звезд имеют весьма различный возраст и что вполне вероятно образование звезд из дозвездной материи и в настоящее время. В этом смысле большое значение имеют работы В. А. Амбарцумяна. Он предложил способ расчета времени, по истечении которого звездные скопления распадутся под влиянием того, что среди составляющих их звезд некоторые приобретают скорость, превышающую параболическую, и покидают скопление. Скорость распада скоплений зависит от их формы, размера и, главное, от их средней плотности. Сильно рассеянные при своем образовании скопления распадаются на отдельные звезды быстрее всего. Структура наблюдаемых скоплений весьма разнообразна и разнообразен должен быть их возраст.

Исследования Б. В. Кукаркина показывают, что наиболее старыми в общем должны быть звезды, образующие сферические подсистемы, в частности образующие ядро Галактики и шаровые скопления. Рассеянные же скопления во многих случаях должны быть в тысячи раз моложе. То же касается и самих звезд, которые не могут быть старше, чем системы, которые они образуют.

Звезды типа Вольфа—Райе так много выбрасывают газа со своей поверхности и излучают так много энергии, что в подобном состоянии могут находиться не более чем 10^4 — 10^5 лет. К числу сравнительно молодых звезд следует отнести все звезды-гиганты, горячие и холодные.

Б. А. Воронцовым-Вельяминовым было показано, что и туманности имеют различные возрасты, — диффузные туманности гораздо старше, чем быстро расширяющиеся планетарные туманности, из которых некоторые могли возникнуть не более тысячи лет назад.

Так реакционным утверждениям об одновременном сотворении всей Вселенной советская наука противопоставила основанное на фактах и правильных расчетах учение о различии в возрастах звезд и их систем, учение о непрестанном возникновении и изменении форм космической материи, подтверждающие философское учение марксизма о вечности Вселенной.

§ 214. Излучение энергии звездами и Солнцем. Наше Солнце и звезды излучают в мировое пространство громадные количества энергии. За одну секунду Солнце излучает $3,8 \cdot 10^{33}$ эргов в форме

лучистой энергии (тепловой, видимой и ультрафиолетовой). В год это составляет $1,2 \cdot 10^{41}$ эргов. Красные звезды-карлики излучают значительно меньше, но все же огромные количества энергии, между тем как звезды-сверхгиганты излучают энергии в десятки тысяч раз больше, чем наше Солнце.

Можно убедиться в том, что удельная излучательная способность (т. е. частное от деления полного излучения звезды на ее массу) у различных звезд еще более различна. Например, у горячих белых сверхгигантов удельное излучение наибольшее и составляет около 10^4 эргов в секунду на грамм ($\text{эрг/сек} \cdot \text{г}$), у обычных желтых гигантов, таких, как Капелла, оно $48 \text{ эрг/сек} \cdot \text{г}$, у желтых карликов (Солнце) $1,9 \text{ эрг/сек} \cdot \text{г}$, у красных карликов оно еще в тысячи раз меньше, и минимальным оно оказывается у белых карликов: порядка 10^{-2} или $10^{-3} \text{ эрг/сек} \cdot \text{г}$.

Это обстоятельство показывает, что мощность освобождения энергии в недрах разных звезд далеко не одинакова, а следовательно, различным должно быть и их внутреннее строение.

§ 215. Гипотезы об источниках энергии Солнца и звезд. Еще до того как было выяснено различие в излучательной способности звезд, высказывались догадки об источниках энергии Солнца. Эти попытки в их историческом развитии неизбежно отразили развитие физики в области изучения законов изменения форм энергии. После открытия всеобщего закона сохранения энергии Р. Майер в 1848 г. выдвинул предположение, что энергия Солнца поддерживается падением на него метеоритов. Кинетическая энергия метеоритов, с огромной скоростью падающих на Солнце, должна превращаться в теплоту (физики только что перед этим установили возможность перехода механической энергии в тепловую).

Подобный источник энергии, несомненно, существует, так как на огромный и массивный солнечный шар должно падать гораздо больше метеоритов, чем их падает на Землю. Однако для поддержания наблюдаемой излучательной способности Солнца на него должно падать недопустимо большое количество метеоритов, вследствие чего масса Солнца должна была бы возрастать. Между тем массы звезд, а следовательно, и Солнца с течением времени, по-видимому, убывают.

В 1854 г. Гельмгольц предположил, что энергия Солнца поддерживается за счет сжатия солнечного шара с течением времени. При подобном сжатии потенциальная энергия тяготения массы Солнца к его центру будет уменьшаться и переходить в энергию тепловую. Теория Гельмгольца позволяет вычислить верхний предел возраста Солнца при его сжатии от бесконечно большого радиуса до его современного радиуса. Даже в этом случае вычисления приводят к возрасту Солнца меньше 20 млн. лет, что явно недостаточно.

В 20-х годах текущего столетия было выдвинуто предположение, что в недрах звезд происходит интенсивный распад радиоактивных элементов, подобных радио и урану. Подсчеты дали, однако, такой результат: если бы Солнце даже целиком состояло из радия,

который больше всех других элементов выделяет энергию ($1,4 \cdot 10^{17}$ эргов при полном распаде грамма радия), то оно излучало бы даже больше, чем действительное Солнце. Однако радий распадается очень быстро — половина его распадается за 2800 лет, так что интенсивность излучения «радиевого Солнца» понижалась бы слишком быстро и не обеспечила бы интенсивности излучения на нужный срок.

Уран распадается медленно: половина за 10^{10} лет; но «урановое Солнце» не могло бы излучать энергию так интенсивно, как Солнце ее сейчас в действительности излучает.

Итак, в свете современных познаний ни падение метеоритов, ни сжатие, ни радиоактивность не могут быть главными источниками энергии звезд и Солнца, хотя каждый из этих процессов, вероятно, имеет место.

В настоящее время в большинстве звезд *источником энергии признается превращение водорода в гелий, сопровождаемое выделением энергии.*

Теория относительности устанавливает связь между массой и энергией:

$$E=mc^2,$$

где E — энергия, m — масса, а c — скорость света. При этом 1 г массы любого вещества соответствует $9 \cdot 10^{20}$ эргам.

Известно, что ядро атома гелия состоит из двух протонов (ядер водорода), двух нейтронов и двух электронов, между тем как сумма масс этих частиц, взятых по отдельности, не равна массе ядра атома гелия. При образовании атома гелия из водорода выделяется вместе со связанной с ними энергией $0,047 \cdot 10^{-24}$ г («эффект упаковки»). На основании сказанного выше при синтезе ядра атома гелия из водорода должно излучиться $4,2 \cdot 10^{-5}$ эргов.

Современная физическая теория атомного ядра хорошо подтверждается экспериментами и устанавливает величины выделяемой энергии и для процессов синтеза других тяжелых атомов из атомов более легких. Она выяснила также и те ядерные реакции, в результате которых лишь и может происходить превращение водорода в гелий. Для возможности подобных реакций в больших масштабах необходима огромная температура в недрах звезд.

Если бы Солнце целиком состояло из водорода, то при его полном превращении в гелий выделилось бы количество энергии, достаточное для излучения в течение 10^{11} лет при интенсивности излучения, равной современной. По всей видимости, энергии, выделяющейся при превращении водорода в гелий, достаточно для поддержания излучения энергии звезд в течение всего срока их существования. Запасы водорода в звездах действительно очень велики, что обеспечивает их излучение, а в старых звездах водород должен быть почти исчерпан.

Белые карлики расходуют мало энергии и черпают ее, по-видимому, почти исключительно за счет сжатия.

§ 216. Внутреннее строение звезд. Астрономическим наблюдениям доступны только внешние слои звезд. Для этих слоев мы знаем плотность, давление и температуру. Для звезд в целом мы знаем их светимость, массу и радиус. Кроме того, из наблюдений известно, что существует тесная статистическая зависимость между массой звезды и ее светимостью и менее строгая связь между светимостями звезд и их спектрами — связь, обнаруживаемая диаграммой «спектр—светимость».

Что происходит и существует в недрах звезд, мы не наблюдаем, и для ответа на этот вопрос должны строить теории. Эти теории должны удовлетворять не только требованиям современной физики, но и наблюдаемым данным, перечисленным выше.

Проблема внутреннего строения звезд чрезвычайно трудна по двум причинам. Во-первых, мы должны знать механизм образования энергии в звездных недрах, распределение этих источников энергии в массе звезды и их зависимость от давления и температуры в звезде. Во-вторых, условия в недрах звезд так сильно отличаются от условий физических опытов в лабораториях, что возникает вопрос о применимости к звездным недрам формул, выведенных на основании опытов на Земле. Отсутствие точного ответа на первый вопрос является главной помехой для установления в настоящее время общепринятой удовлетворительной теории звездных недр для звезд всех типов.

Теория внутреннего строения звезд возникла в конце 20-х годов текущего столетия. Эддингтоном в Англии было доказано положение, что в недрах звезд, кроме силы тяжести и давления газа, играет важную роль давление света. Обычные звезды, по-видимому, целиком состоят из газа, подчиняющегося обычным газовым законам. Звезды — белые карлики — считают целиком состоящими из так называемого вырожденного газа огромной плотности.

Эти теории дают распределение физических параметров как функции расстояния от центра звезды. Укажем лишь следующие несомненные выводы из всех такого рода теорий.

В недрах звезд, подобных Солнцу, господствует температура порядка 20 млн. градусов, вследствие чего атомы любых элементов там почти полностью ионизированы. Давление и плотность в недрах звезд далеко превосходит все то, что имеет место на Земле. Такие условия и вызывают ядерные реакции гигантского масштаба.

§ 217. Возникновение и развитие звезд из диффузной материи. В процессе исторического развития науки мир звезд был изучен позднее, чем солнечная система. Естественно поэтому, что материалистически мыслящие умы человечества прежде всего пытались разрешить проблему образования солнечной системы и лишь в последнее время стало возможно говорить о развитии и других систем небесных тел. Вместе с тем стало ясно и то, что проблемы возникновения и развития звезд и окружающих их планетных систем тесно связаны друг с другом. К настоящему времени главным об-

разом трудами советских ученых накоплено множество фактов и выводов, имеющих большое значение для космогонии.

Мы знаем, что большие звездные системы, подобные нашей Галактике, содержат вещество в двух основных формах: в форме звездного газа, конденсированного в сравнительно плотные шары, и в форме диффузной материи (газовые и пылевые туманности и межзвездная среда). Масса диффузной материи в нашей Галактике по разным оценкам в несколько раз меньше общей массы звезд, но во всяком случае она очень значительна.

Именно поэтому естественно поставить вопрос о том, не происходит ли тесного взаимодействия между диффузной материей и звездами и не способны ли они к взаимным превращениям.

Всесоюзная конференция по звездной космогонии, происходившая в мае 1952 г. в Москве, отметила среди завоеваний советской науки установление важнейшего в философском отношении факта: диффузная материя в Галактике возникает и в наше время посредством выброса газа с поверхности звезд. Это явление было обнаружено и доказано впервые в 1931 г. Б. А. Воронцовым-Вельяминовым на основании его подсчета количества газов, постоянно выбрасываемых новыми звездами и горячими звездами. Выбрасывают газ и другие звезды, но в какой мере, пока еще не установлено.

Образование диффузной материи из звезд теперь общепризнано, но еще не установлено, не имеет ли она и других источников происхождения.

Огромное значение имел также описанный ранее вывод советских ученых о различии возраста различных звезд в нашей Галактике. В 1947 г. В. А. Амбарцумян выдвинул доводы в пользу того, что звезды в Галактике возникают и в настоящее время. Это предположение повело к широкому развитию космогонических исследований в СССР и за рубежом и к нахождению ряда новых признаков того, что в Галактике происходит групповое возникновение звезд, не исключающее, однако, возможности возникновения и одиночных звезд.

К своим плодотворным выводам о продолжающемся процессе звездообразования в Галактике Амбарцумян пришел, исходя из предположения о том, что видимое скучивание на небе горячих звезд вызвано их реальным скучиванием в пространстве. Он предполагает, что это крайне рассеянные системы звезд, слабо связанные поэтому тяготением, и неустойчивые, причем размеры их больше, чем у рассеянных звездных скоплений, и меньше, чем у звездных облаков, из которых состоят спиральные ветви Галактики. Неустойчивость этих групп, названных *звездными ассоциациями*, говорила бы об их недавнем происхождении и о быстром распаде, гармонируя с заключением, что, судя по быстрой потере энергии путем излучения, горячие звезды в таком своем состоянии пребывают недолго. Многие астрономы находят, что признаки распада таких групп наблюдаются, хотя это еще требует дальнейших исследований.

В. А. Амбарцумян полагает, что звезды возникают группами из каких-то неизвестных тел, но большинство астрономов считает, что хотя еще неизвестные нам формы материи в Галактике возможны, но вероятнее, что звезды возникают путем конденсации диффузной материи при наличии подходящих для этого условий.

Теоретические соображения показывают также возможность конденсации разреженного газа в космическую пыль и превращения пылинок в газ при соударениях.

За рубежом пользуются успехом реакционные «теории», оторванные от фактических данных и проповедующие либо одновременное создание всех небесных тел для согласования с библией, либо предполагающих возникновение материи из ничего, т. е. утверждающих продолжение акта «сотворения мира».

В противоположность этому советская материалистическая наука вскрывает диалектический характер развития природы и, уверенная в неограниченной возможности познания природы, опирается в своих теоретических выводах на передовую философию диалектического материализма, на всестороннюю практику, на наблюдения природы.

По-видимому, в галактиках происходит длительный круговорот материи. Диффузное вещество сгущается в звезды, которые, сформировавшись, выбрасывают в пространство обратно значительные массы газа, не распыляясь при этом, однако, нацело. Образующиеся из звезд диффузные туманности снова конденсируются в звезды, но при этом не происходит повторений пройденного. Новые превращения отличны от прежних и количественно и качественно, так как в звездах происходят ядерные реакции, ведущие к изменению химического состава звезд, а следовательно, и выбрасываемых ими газов и вновь формирующихся звезд. Меняется при этом и структура звездных систем, так как меняются темпы и условия таких превращений.

Всесоюзное совещание по звездной космогонии, происходившее в мае 1952 г. в Москве, пришло к следующему выводу о возможности такого развития звезд главной последовательности после их возникновения. Вновь возникшая звезда вначале находится в неустойчивом состоянии, и из нее происходит мощное истечение газа. Постепенно она становится устойчивее, светимость ее падает, что на диаграмме «спектр — светимость» соответствует приближению к состоянию звезд главной последовательности, причем звезды, возникая, принадлежат к весьма различным спектральным классам. В дальнейшем испускание газа звездой и скорость вращения ее все более и более замедляются, так как энергия вращения теряется вместе с выбрасываемой массой. Это обстоятельство было подчеркнуто В. Г. Фесенковым, который полагает, что таким образом наше Солнце потеряло скорость своего вращения и что в прошлом Солнце было быстро вращающейся горячей звездой, обладавшей массой и размерами, во много раз превосходившими современные.

Действительно, предполагая вместе с В. Г. Фесенковым и А. Г. Масевич потерю вещества звездами, происходящую в определенной зависимости от их светимости, можно прийти к выводу о том, что звезда главной последовательности в дальнейшем будет сжиматься и охлаждаться, проходя через состояния звезд главной последовательности от В до G. В классе G, к которому принадлежит наше Солнце, оно может находиться миллиарды лет, расходуя мало энергии и теряя мало массы, тогда как в ранних стадиях горячей звезды изменения его состояния происходили гораздо быстрее.

Пока еще не выяснено происхождение и развитие звезд сферических подсистем, например в шаровых скоплениях и в ядрах галактик, которые возникли раньше, чем звезды плоских систем.

Что касается белых карликов, то их считают звездами, исчерпывающими свои запасы водорода в процессе ядерных реакций и сжавшимися до сверхплотного состояния. В этом состоянии они могут существовать миллиарды лет, так как сжатие вполне достаточно для восполнения малого расхода их энергии. В белых карликов, по-видимому, превращаются новые звезды в конце своего развития. Могут существовать и другие пути превращения звезд в белые карлики.

Конечно, мы не можем установить весь бесконечный путь превращения материи во всем ее бесконечном разнообразии и в бесконечности времени. Однако уже за короткий срок развития науки мы убедились в изменяемости небесных тел, в их непрерывном возникновении и развитии.

§ 218. Закономерности в солнечной системе. В солнечной системе обращают на себя внимание следующие закономерности, важные для выяснения ее происхождения:

1) все без исключения планеты обращаются вокруг Солнца в одном и том же направлении; в том же направлении они, кроме Урана, вращаются вокруг своих осей;

2) эксцентриситеты планетных орбит почти все очень малы (за исключением орбит некоторых малых планет и орбиты Плутона);

3) наклонения орбит почти всех планет очень незначительны, иначе говоря: плоскости орбит очень мало наклонены к плоскости эклиптики (опять-таки за исключением орбит некоторых малых планет и орбиты Плутона);

4) центральное тело нашей солнечной системы — Солнце — вращается вокруг своей оси в том же направлении, в каком обращаются вокруг него планеты;

5) расстояния от планет до Солнца составляют некоторую прогрессию, которая приближенно может быть выражена так называемым правилом Тициуса и Боде;

6) большинство спутников обращается вокруг своих центральных планет в том же направлении, в каком эти планеты обращаются вокруг Солнца;

7) орбиты спутников планет тоже почти круговые, как и орбиты планет, и в подавляющем большинстве случаев расположены почти в плоскостях экваторов их планет;

8) планеты с наибольшей массой (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) имеют наименьшую плотность и вместе с тем вращаются вокруг своих осей *быстрее*, нежели планеты с наименьшими массами.

Все эти отмеченные нами закономерности возникли, как можно предположить, в результате какого-нибудь закономерного эволюционного процесса, который в конце концов привел к образованию нашей солнечной системы.

§ 219. **Первые космогонические гипотезы.** В первой половине XVIII в. Бюффон сделал попытку объяснить указанные закономерности солнечной системы, предположив, что материя, образовавшая планеты, была выброшена из недр Солнца кометой, упавшей на него. Под давлением профессоров теологии Бюффону пришлось, однако, «отречься» подобно Галилею от своей материалистической гипотезы. Но она с научной стороны оказалась несостоятельной.

Замечательная попытка философа Иммануила Канта объяснить возникновение планет была изложена в появившемся без имени автора сочинении «Всеобщая естественная история и теория неба, или опыт об устройстве и механическом происхождении всего мироздания на основании ньютоновских законов» (1755). В этом сочинении молодой и смелый ньютонианец уже решительно выступал против религии. Энгельс в «Диалектике природы» назвал сочинение Канта «составившим эпоху», первой брешью, пробитой в окаменелом воззрении на природу не естествоиспытателем, а философом. Энгельс прибавляет, что «в открытии Канта заключалась отправная точка всего дальнейшего движения вперед». В предисловии к своей книге Кант провозгласил следующие гордые слова: «Дайте мне материю, я построю из нее мир».

Кант предположил, что солнечная система образовалась из некоторого космического облака, «хаоса», как называет его Кант. Мировое пространство Кант мыслит себе заполненным «инертной, бесформенной и неупорядоченной» материей, которая, однако, имеет в этом простейшем своем состоянии «стремление преобразоваться в более организованную путем естественного развития».

Ограничиваясь главным образом рассмотрением эволюции солнечной системы, Кант в своей книге пришел к выводу, что планеты в дальнейшем образовались из твердых частиц, которые описывали вокруг притягивающего центра (будущего Солнца) приблизительно круговые орбиты. Поэтому и орбиты планет остались близкими к круговым, а сами планеты стали двигаться в ту же сторону, в какую двигались образовавшие их некогда частицы.

§ 220. **Гипотеза Лапласа.** В 1796 г. Лаплас опубликовал сочинение «Изложение системы мира». В VII и последнем примечании к этой книге он изложил гипотезу об образовании солнечной си-

стемы, отчасти основанную на результатах его исследований, которые содержались в его большом трактате по небесной механике. Лаплас воображал себе первичное Солнце в виде звезды колоссальнейших размеров, такой, например, какой мы знаем теперь звезду VV Цефея.

Этот сверхгигант имеет столь колоссальные размеры, что в недрах его могли бы поместиться вместе с Солнцем в центре орбиты планет Меркурия, Венеры, Земли, Марса и даже Юпитера, хотя радиус орбиты Юпитера составляет почти 778 млн. км.

Первичное лапласово Солнце медленно вращалось, охлаждалось и конденсировалось. По мере сжатия этого сверхгиганта скорость его вращения около оси должна была увеличиваться (вследствие сохранения момента количества движения). С другой же стороны, центробежная сила у экватора первичного Солнца должна была постепенно возрастать. В самом деле, согласно теореме о моменте количества движения системы, предполагая при этом, что на первичное Солнце не действуют никакие внешние силы, мы будем иметь:

$$I\omega = \text{const},$$

где I — момент инерции первичного Солнца относительно оси вращения, а ω — угловая скорость его осевого вращения. При сжатии первичного Солнца его момент инерции уменьшается, а следовательно, ω , наоборот, должна увеличиваться. Увеличение скорости поведет к постепенному увеличению центробежной силы. Там, где сила центробежная станет наибольшей, т. е. в плоскости экватора туманности, от первичного Солнца должно было в конце концов отделиться газовое кольцо, а остальная масса продолжала сжиматься и далее. Лаплас говорил о «поясах паров», следовательно оставленных сгущавшейся атмосферой первичного Солнца. Стало быть, по мнению Лапласа, планеты образовались из concentрических *газовых колец*, обращавшихся вокруг Солнца.

Далее согласно Лапласу каждое подобное кольцо должно было «разорваться на несколько масс». Эти массы постепенно должны были конденсироваться каким-то неясным для нас образом непременно в одну планету (рис. 235). Так гипотеза Лапласа описывает процесс планетообразования.

Последовательно расположенные концентрические кольца с широкими между ними промежутками образовали постепенно все большие планеты солнечной системы. Спутники планет, по мнению Лапласа, возникли тоже из колец, отделенных самими планетами.

Математическая обработка гипотезы Лапласа была произведена только во второй половине XIX в.

§ 221. Возражения против гипотезы Лапласа. Вследствие своей простоты гипотеза Лапласа сделалась излюбленной космогонической гипотезой XIX в. и завоевала себе большую популярность не только у астрономов, но и у геологов. Многие из главных особенностей солнечной системы кольцевая гипотеза действительно

объясняет очень хорошо. В самом деле, планеты, образовавшиеся из лапласовых газовых колец, должны были двигаться вокруг Солнца в одном направлении и иметь приблизительно круговые орбиты, лежащие почти в одной плоскости. То же самое можно сказать и относительно спутников, отделившихся от планет. Однако, несмотря на всю привлекательность кольцевой гипотезы Лапласа, против нее примерно к 1900 г. был выдвинут ряд серьезных возражений, из которых приведем следующие:

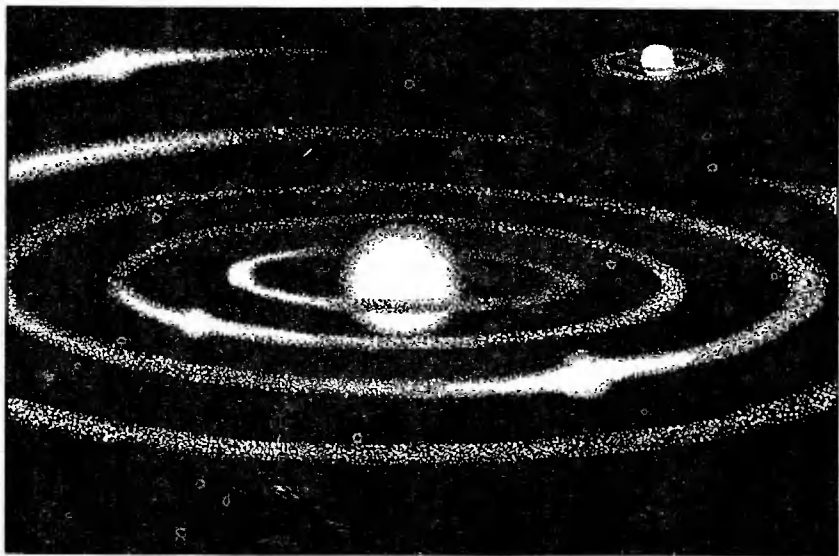


Рис. 235. Схема образования планет по гипотезе Лапласа

1. Она не предусматривает существования в солнечной системе *обратных* спутников и приводит к обратному, а не к прямому вращению планет вокруг своей оси.

2. Она исходит из положения, что период вращения каждой планеты вокруг оси непременно *должен быть короче*, нежели самый короткий из периодов обращения ее спутников. Однако и это условие, требуемое кольцевой гипотезой, тоже нарушается: ближайший к планете Марс спутник Фобос обращается вокруг Марса в $7^{\text{ч}} 39^{\text{м}}$, тогда как сама планета завершает свой полный оборот вокруг оси в $24^{\text{ч}} 37^{\text{м}}$.

3. Вещество первичного лапласова Солнца было столь разрежено, что оно не могло бы вращаться, как твердое тело, как этого требует гипотеза Лапласа, а кольца не могли бы сгуститься в планеты.

Перечисленные три возражения не позволяют считать гипотезу Лапласа приемлемой, какой ее считали вплоть до 80-х годов XIX в. Однако существует и еще более серьезное возражение против этой гипотезы: это

4. *Распределение момента количества движения в солнечной системе в современную эпоху.*

Момент количества движения солнечной системы можно выразить формулой:

$$L = \Sigma m \omega a^2,$$

где m — масса планеты, a — ее среднее расстояние от Солнца, ω — угловая скорость.

По этой формуле можно с достаточной точностью вычислить моменты количества движения для каждой из больших планет солнечной системы. Результаты приведены в таблице 28. Следовательно, можно принять, что момент количества движения *системы планет* составляет около 1175.

Если бы Солнце было однородным шаром, то его момент количества движения оказался бы равным 41 единице. А так как оно, несомненно, уплотняется к центру, то момент количества движения его будет еще меньше.

Из таблицы 27 видно, что в движениях больших планет заключено почти 98% всего момента количества движения солнечной системы. Для *изолированной системы*, какой можно представить себе нашу солнечную систему, момент количества движения должен оставаться постоянным, так как никакие внутренние силы его изменить не могут.

Спрашивается, почему же момент количества движения планет мог достигнуть такой очень большой величины. Некоторые ученые стали предполагать, что столь большой момент количества движения планет мог быть внесен в нашу солнечную систему как-то «извне». Другими словами, какая-то внешняя причина некогда оказала определенное воздействие на Солнце, но в прежнем, а не в теперешнем его состоянии.

§ 222. **Критика катастрофических гипотез в возникновении солнечной системы.** Среди гипотез, выдвинутых впоследствии на смену гипотезе Лапласа, наибольшим распространением пользовалась до недавнего времени гипотеза английского астрофизика Джинса. В катастрофической гипотезе Джинса предполагается, что два сближившихся тела — звезда и Солнце — прошли очень близко друг от друга, т. е., можно сказать, почти столкнулись между собой. Таким образом, Джинс рассматривает случай очень «тесного» сближения двух солнц. Совершенно очевидно, что на поверхности двух сближившихся светил могут, при подобных сближениях, обра-

Таблица 28

Меркурий	0,027
Венера	0,69
Земля	1,00
Марс	0,13
Юпитер	722,80
Сатурн	293,60
Уран	63,90
Нептун	93,20

Сумма 1175,35

зоваться колоссальные приливные выступы, которые затем принимают форму двух длинных «струй» или потоков газа. Из этих газовых «струй» и образовались планеты.

Впоследствии газовые струи, изверженные из Солнца, разделяются на отдельные сгустки — будущие планеты.

Гипотеза Джинса приводит к заключению, что система, подобная нашей солнечной, представляет собой исключительно редкое явление во Вселенной. Вероятность близких прохождений звезд ничтожно мала. Звезда может сблизиться с другой звездой один раз в 10^{17} лет. Стало быть, с точки зрения всех таких катастрофических гипотез солнечная система оказывается каким-то исключительным явлением в окружающий нас Галактике, явлением случайным.

Уже это приписывание редкой случайности образованию Земли и планет указывает на идеалистический характер построения гипотезы Джинса. Неудивительно, что она была подхвачена и особенно поддержана учеными-идеалистами. Но, помимо этого, появились и теоретические возражения против этой гипотезы. Когда подсчитали момент количества движения приблизившейся к Солнцу звезды на единицу ее массы, оказалось, что он примерно в 10 раз меньше среднего момента количества движения планет солнечной системы в настоящее время. Таким образом, и гипотеза Джинса подвержена тому же возражению, которое было выставлено против гипотезы Лапласа.

Полная несостоятельность гипотезы Джинса была обнаружена работами Ресселла в США и Н. Н. Парийского в СССР, который произвел вычисление траекторий выброшенных из недр Солнца сгустков вещества при приближении к Солнцу чужой звезды.

Обнаруживающаяся со временем несостоятельность научных гипотез не может нас привести к скептическому отношению к гипотезам вообще. Гипотезы совершенствуются по мере дальнейших достижений науки. Совершенствование гипотез заключается в учете все новых и новых фактов, добываемых наблюдениями и исследованиями. При построении новых гипотез делается дальнейший шаг вперед в нашем познании об эволюции миров во Вселенной. Здесь надо вспомнить слова Энгельса о роли гипотез в науке: «Формой развития естествознания, поскольку оно мыслит, является *гипотеза*. Наблюдение открывает какой-нибудь новый факт, делающий невозможным прежний способ объяснения фактов, относящихся к той же самой группе. С этого момента возникает потребность в новых способах объяснения, опирающегося сперва только на ограниченное количество фактов и наблюдений. Дальнейший опытный материал приводит к очищению этих гипотез, устраняет одни из них, исправляет другие, пока, наконец, не будет установлен в чистом виде закон. Если бы мы захотели ждать, пока материал будет готов *в чистом виде* для закона, то это значило бы приостановить до тех пор мыслящее исследование, и уже по одному этому мы никогда не получили бы закона» (Ф. Э н г е л ь с, Диалектика природы, 1955, стр. 191).

§ 223. Современные гипотезы образования солнечной системы.

На основе изучения закономерностей в солнечной системе, разработки теорий конденсации и роста сгущений в диффузных средах и их рассеяний, с учетом химического состава планет к настоящему времени подавляющее большинство ученых пришло к выводу о том, что планеты возникли из холодного газо-пылевого облака, которое раньше должно было окружать Солнце.

Различие существующих сейчас гипотез и теорий заключается в различии взглядов на процесс формирования планет из этой разреженной среды, в различной оценке роли факторов, которые могли играть роль в первичном газо-пылевом облаке. Так, в гипотезе немецкого ученого Вейцекера главная роль приписывается предполагаемой турбулентции и завихрениям, в гипотезе акад. В. Г. Фесенкова — потере массы быстро вращающимся первичным Солнцем и гравитационным взаимодействием Солнца и образующихся вокруг него сгущений. Сложность этих проблем, требование объяснить множество разнообразных механических, физических и химических фактов, быстро возникающая критика концепций обуславливают быстрые и существенные изменения этих гипотез, среди которых нет еще полностью устоявшихся.

Наиболее детальную разработку получила гипотеза, основные идеи которой были в 1944 г. выдвинуты акад. О. Ю. Шмидтом. В процессе ее изучения и обсуждения им самим, его последователями и его критиками она претерпела за 15 лет существенные изменения и продолжает разрабатываться дальше. Эту гипотезу можно было бы назвать гипотезой школы О. Ю. Шмидта.

Решающий момент в эволюции облака усматривается в существовании мелкой пыли в протопланетном облаке, окружавшем Солнце и имевшем массу, не на много превосходившую сумму масс современных планет. Облако имело вращение около Солнца и уже содержало наблюдаемый сейчас у планет момент количества вращения. Пылинки и молекулы имели еще и хаотические движения, более медленные, конечно, у пылинок и более быстрые у более легких молекул.

При неупругих столкновениях часть энергии движения пылинок превращалась в тепло и рассеивалась, а скорости пылинок уменьшались и осреднялись, отчего в облаке пыль образовала вокруг Солнца сплошной диск с повышенной плотностью. Тогда более крупные пылинки стали присоединять к себе мелкие и расти, в результате чего возникли сгущения пыли, часть которых устояла против разрушающих их приливных сил, вызванных Солнцем. В таких сгущениях неупругие столкновения повышали плотность дальше и возникали тела с поперечником до нескольких сот километров. Сталкиваясь, эти тела частично дробились снова, но вместе с первичным веществом образовывали новые сгущения и тела. Эти зародыши планет, вращаясь все в ту же сторону, куда вращалось облако, «вычерпывали» окружающее вещество при столкновениях и вследствие притяжения его. Зародыши, избежавшие гибели

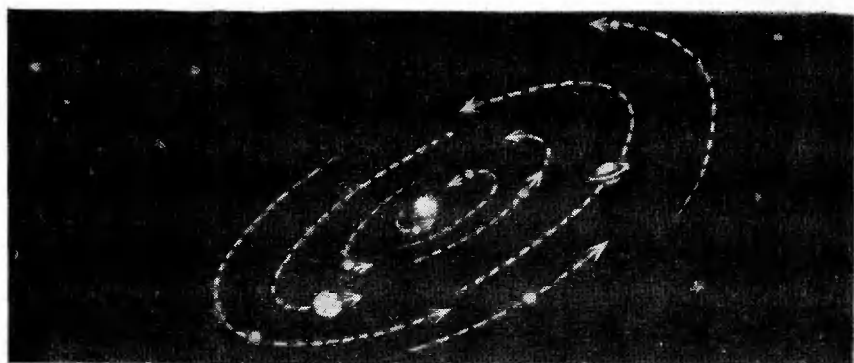
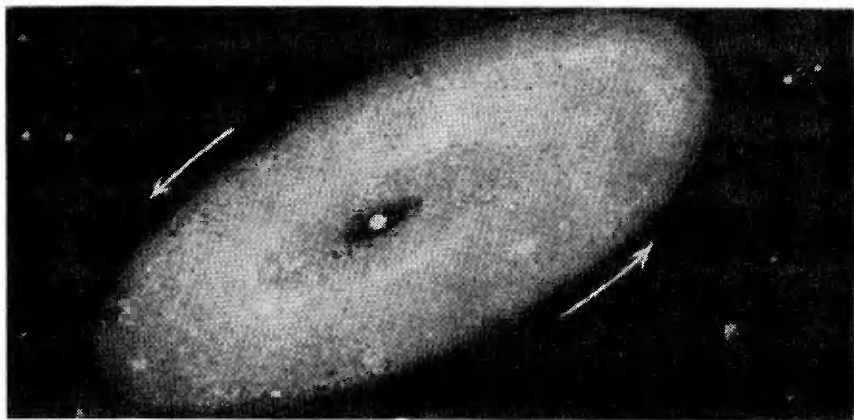


Рис. 236. Схема образования планет по гипотезе О. Ю. Шмидта

при столкновениях, вычерпав вещество вблизи своего пути, стали планетами. Их вращение в прямом направлении удалось объяснить расчетом итога их столкновений, при которых часть энергии переходит в тепло.

Вблизи Солнца было жарко и там существовали только тугоплавкие каменные пылинки, сформировавшие плотные внутренние планеты. Дальше проникновению солнечного тепла мешал слой пыли, его окружавший, и здесь легкие газы конденсировались, намерзали на пылинках. Так во внешней зоне образовались планеты, богатые легкими элементами, даже водородом.

Сам О. Ю. Шмидт предполагал, что газо-пылевое облако было захвачено притяжением Солнца при его прохождении сквозь туманность, состоявшую из газа и пыли. Но захват требует очень малой относительной скорости, что маловероятно при случайной встрече. Поэтому большинство ученых полагает, что облако либо возникло одновременно с Солнцем, либо было им захвачено из среды тех газо-пылевых облаков, из которых возникло оно само и окружавшие его тогда звезды. Дальнейшее развитие науки принесет более полное и более правильное представление об истории нашей Земли и планет.

§ 224. Вселенная как материальный процесс, развертывающийся бесконечно во времени и пространстве. Некоторые буржуазные физики, как это отмечалось выше (см. главу XIII), объявили Вселенную в целом конечной, исходя из теории относительности. К этому присоединяют свой голос и те ученые того же толка, которые обосновывают свои выводы на старой идее, выдвинутой еще в прошлом столетии немецким физиком Клаузиусом из второго положения термодинамики, что «энтропия Вселенной стремится к максимуму». Это значит, что чем больше энтропия, тем менее обратимы мировые процессы, тем ближе Вселенная к «тепловой смерти», т. е. к такому состоянию, при котором должен прекратиться всякий обмен тепла между мировыми телами. Вселенная, если бы это случилось, превратилась бы в мрачное кладбище, где жизнь замерла бы совершенно. Здесь особенно характерны рассуждения упоминавшегося уже нами английского астрофизика Джинса, который в своих книгах, в том числе в последней, выпущенной в 1944 г., незадолго до его смерти, писал вполне категорически, что превращение «масса — излучение» встречается повсюду, а обратное превращение — нигде. Материя не может возникнуть из излучения, и разрушенные радиоактивные атомы не могут восстановиться. Машина Вселенной, как выражался Джинс, постоянно ломается, трескается и разрушается, и реконструкция ее невозможна.

Эти рассуждения становятся явно абсурдными перед материалистическим представлением о том, что Вселенная бесконечна во времени и пространстве. Ключ к пониманию этого мы находим в следующих словах Энгельса: «Мы приходим, таким образом, к выводу, что излученная в мировое пространство теплота должна иметь возможность каким-то путем, — путем, установление ко-

того будет когда-то в будущем задачей естествознания, — превратиться в другую форму движения, в которой она может снова сосредоточиться и начать активно функционировать. Тем самым отпадает главная трудность, стоявшая на пути к признанию обратного превращения отживших солнц в раскаленную туманность» (Ф. Э н г е л ь с, Дialeктика природы, 1955, стр. 18).

В настоящее время это гениальное предвидение Энгельса оправдывается: современная физика допускает и обратный переход энергии, излучаемой звездами, — процесс превращения фотонов в «молодые атомы». После работ Жолио-Кюри и ряда других физиков представление об обратном превращении в глубинах космического пространства радиации в атомы кажется вероятным.

«. . вечный круговорот, в котором движется материя, — круговорот, который завершает свою траекторию лишь в такие промежутки времени, для которых наш земной год уже не может служить достаточной единицей измерения; круговорот, в котором время наивысшего развития, время органической жизни, и еще более, время жизни существ, сознающих себя и природу, отмерено столь же скудно, как и то пространство, в пределах которого существует жизнь и самосознание; круговорот, в котором каждая конечная форма существования материи — безразлично, солнце или туманность, отдельное животное или животный вид, химическое соединение или разложение — одинаково преходяща и в котором ничто не вечно, кроме вечно изменяющейся, вечно движущейся материи и законов ее движения и изменения. Но как бы часто и как бы безжалостно ни совершался во времени и в пространстве этот круговорот; сколько бы миллионов солнц и земель ни возникло и ни погибло; как бы долго ни длилось время, пока в какой-нибудь солнечной системе и только на одной планете не создались условия для органической жизни. . . — у нас есть уверенность, что материя во всех своих превращениях остается вечно одной и той же, что ни один из ее атрибутов никогда не может быть утрачен. . . » (Ф. Э н г е л ь с, Дialeктика природы, 1955, стр. 18—19).

Говоря о круговороте во Вселенной, об обратимых процессах, надо в то же время ясно понимать, что процесс развития не есть простое повторение пройденного, не движение по кругу, а движение поступательное, движение по восходящей линии, переход к новому качественному состоянию.

«Природа есть пробный камень диалектики, и современное естествознание, представившее для этой пробы чрезвычайно богатый, с каждым днем увеличивавшийся материал, тем самым доказало, что в природе в конце концов все совершается диалектически, а не метафизически, что она движется не в вечно однородном, постоянно сызнова повторяющемся круге, а переживает действительную историю» (Ф. Э н г е л ь с, Анти-Дюринг, 1950, стр. 22—23).

Основные астрономические постоянные
(значения, принятые международными соглашениями)

Постоянная солнечного параллакса	8",80
Постоянная аберрации	20",47
Постоянная нутации	9",21
Годовая прецессия ¹	50",2564—0",00022 <i>t</i>
Наклонение эклиптики к экватору ¹	23°27'8",26—0",468 (<i>t</i> —1900)
Постоянная Гаусса (постоянная тяготения)	$k = 0,017202099$
Экваториальный радиус Земли ²	6 378,245 км
Полярный радиус Земли ²	6 356,864 км
Сжатие Земли ²	$1/298,3$
Нормальное ускорение силы тяжести ³ $g=9,78049 (1 + 0,005\,288 \sin^2\varphi)$ м/сек ²	
Астрономическая единица	149 500 000 км
Средние сутки	$= 1,002\,737\,909$ зв. сут. $= 24^h 3^m 56^s,5554$ зв. вр.
Звездные сутки	$= 0,997\,269\,566$ ср. сут. $= 23^h 56^m 4^s,0905$ ср. вр.
Сидерический месяц	$= 27,321\,6610$ ср. сут. $= 27^d 7^h 43^m 11^s,51$ ср. вр.
Синодический месяц	$= 29,530\,588\,2$ ср. сут. $= 29^d 12^h 44^m 2^s,82$ ср. вр.
Сидерический год	$= 365,256\,360\,4$ ср. сут. $= 365^d 6^h 9^m 9^s,54$ ср. вр.
Тропический год ¹	$= 365,242\,1988$ ср. сут. $= 365^d 5^h 48^m 45^s,98$ ср. вр.

Приложение 2

Греческий алфавит

Буквы	Названия	Буквы	Названия	Буквы	Названия
Α α	альфа	Ι ι	йота	Ρ ρ	ро
Β β	бэта	Κ κ	каппа	Σ σς	сигма
Γ γ	гамма	Λ λ	ламбда	Τ τ	тау
Δ δ	дельта	Μ μ	мю	Υ υ	ипсилон
Ε ε	эпсилон	Ν ν	ню	Φ φ	фи
Ζ ζ	дзета	Ξ ξ	кси	Χ χ	хи
Η η	эта	Ο ο	омикрон	Ψ ψ	пси
Θ θ	тета	Π π	пи	Ω ω	омега

¹ Где *t*—время в годах после 1900, 0.² Элементы земного сфероида даны по Ф. Н. Красовскому.³ На уровне моря φ —географическая широта.⁴ Для эпохи 1900, 0; длина тропического года уменьшается на 0", 53 в столетие.

Элементы орбит больших планет
(эпоха 1930, января 0^д, 0 всемирного времени)

Название	Наклонение орбиты к эк- липтике	Долгота восходя- щего узла	Долгота перигелия	Средняя долгота	Большая полуось орбиты	
					в астро- номич. единицах	в млн. км
Меркурий . .	7°00'12"	47 30'05"	76°21'59"	20°24'01"	0,387099	57,9
Венера	3 23 38	76 02 59	130 35 10	258 31 50	0,723332	108,1
Земля	0 00 00	—	101 44 12	99 55 39	1,000000	149,5
Марс	1 51 00	49 01 04	334 46 14	276 15 27	1,523688	227,8
Юпитер	1 18 25	39 44 28	13 11 41	68 56 26	5,202803	777,8
Сатурн	2 29 28	113 02 43	91 40 34	273 37 05	9,538843	1426,1
Уран	0 46 22	73 38 28	169 31 47	12 20 01	19,190978	2869,1
Нептун	1 46 35	131 00 31	44 01 07	150 59'03	30,070672	4495,7
Плутон ¹ . . .	17 18 48	108 57 16	222 28 34	121 24 14	39,517774	5908,0

Элементы орбит больших планет (продолжение)

Название	Эксцентриситет орбиты	Сидерический период обращения		Среднее суточное движение	Средняя ско- рость на ор- бите в км/сек	Расстояние от Земли в млн. км	
		В сиде- рич.ск. годах	в сред- них сутках			наимень- шее	наиболь- шее
Меркурий .	0,205620	0,24084	87,9693	14732',4199	48,89	82	217
Венера . .	0,006806	0,61519	224,7008	5767, 6698	35,00	40	259
Земля . . .	0,016738	1,00000	365,2564	3648, 1928	29,77	—	—
Марс	0,093340	1,88082	686,9797	1886, 5186	24,22	56	400
Юпитер . . .	0,048387	11,86178	4332,5879	299, 1284	13,07	591	965
Сатурн . . .	0,055786	29,45660	10759,2008	120, 4550	9,65	1199	1653
Уран	0,047129	84,01209	30685,93	42, 2366	6,80	2586	3153
Нептун . . .	0,008553	164,78201	60187,65	21, 5327	5,43	4309	4682
Плутон ¹ . .	0,24684	248,421	90737,2	14, 2830	4,74	4303	7517

¹ Для Плутона эпоха — 1930, сентября 0^д, 0

Физические характеристики больших планет

Название	Экваториальный диаметр, видимый с Земли		Истинный экваториальный диаметр		Сжатие у полюсов		Объем		Масса	
	наиб.	наим.	в км	Земли=1			млрд. км³	Земли=1	Солнца=1	10 ²⁷ з
Меркурий	12",9	4",9	5 140	0,40	0		0,071	0,07	1 7 500 000	0,3
Венера	65,2	10,0	12 600	0,99	0		1,050	0,97	1 408 000	4,9
Земля	—	—	12 756	1,00	1 298		1,083	1,00	1 333 000	6,0
Марс	25,5	3,5	6 860	0,54	1 190		0,168	0,15	1 3 093 000	0,6
Юпитер	50,1	30,7	143 600	11,26	16		1457	1345	1 1047	1900
Сатурн	20,7	15,0	120 600	9,45	1 9,6		824	760	1 3500	568
Уран	4,3	3,5	53 400	4,19	1 15		75	69	1 22 800	88
Нептун	2,4	2,2	49 700	3,90	45		63	58	1 19 300	103

Название	Средняя плотность		Ускорение силы тяжести на экваторе		Скорость «улетучивания» в км/сек	Период вращения вокруг оси	Наклонение экватора к орбите	Скорость вращения на экваторе в км/сек	Интенсивность излучения Солнца (на Земле=1)	Звездная величина в среднем по противостоянию ¹	Альbedo
	Земли=1	г/см ³	Земли=1	м/сек ²							
Меркурий	0,69	3,8	0,27	2,7	3,8	87° 23' 16"	0°	0,002	6,7	+0,7 ^m , 2	0,07
Венера	0,84	4,7	0,84	8,2	10,2	?	?	?	1,9	—4,1	0,59
Земля	1,00	5,52	1,00	9,8	11,2	23° 56'	23° 27'	0,465	1,0	—3,8	0,29
Марс	0,70	3,8	0,37	3,6	5,0	24 37	25 12	0,243	0,43	—1,9	0,15
Юпитер	0,24	1,3	2,32	22,7	59,5	9° 50' — 9° 56"	3 07	12,7	0,037	—2,2	0,44
Сатурн	0,13	0,7	0,92	9,0	35,5	10 14 — 10 38	26 45	10,3	0,011	+0,9 до 0,2	0,42
Уран	0,22	1,3	0,78	7,7	21,2	10° 4,8	98	4,3	0,0027	—5,7	0,45
Нептун	0,30	1,6	1,11	10,8	23,5	15 46	29	2,7	0,0011	—7,6	0,52

¹ Для Меркурия и Венеры — в элонгации, для Земли — видимая с Солнца, для Сатурна даны два числа, в зависимости от степени раскрытия кольца

Элементы орбит спутников планет¹

Планета	Спутник	Год открытия	Среднее расстояние от центра планеты		Сидерический период обращения	Наклонение орбиты к орбите планеты	Эксцен- трицит	Звездная величина в среднем противо- стоянии	Диаметр в км	Масса (планета=1)
			в экваториаль- ных радиусах планеты	в тыс. км						
Земля	Луна	—	60,27	384,40	27 ^d 7 ^h 43 ^m 11 ^s ,5	5°8',6	0,055	-12 ^m ,6	3476	1/81
Марс	Фобос Деймос	1877 1877	2,77 6,95	9,40 23,60	0 7 39 14 1 6 17 35	25 11 24 16	0,017 0,003	+11,5 13,0	15 8	? ?
Юпитер	V.	1892	2,53	181,00	0 11 57 23	3 07	0,003	14,0	160	?
	I. Ио	1610	5,91	422,00	1 18 27 34	3 07	0,000	5,5	3700	1/28000
	II. Европа	1610	9,40	671,00	3 13 13 42	3 06	0,000	6,1	3220	1/40000
	III. Ганимед	1610	14,99	1070,00	7 03 42 33	3 02	0,001	5,1	5150	1/12000
	IV. Каллисто	1610	23,36	1881,00	16 16 32 11	2 43	0,007	6,2	5180	1/20000
	VII.	1904	160,46	11400,00	251	28 45	0,155	14,7	160	?
	VIII.	1905	164,46	11700,00	260	27 58	0,207	17,5	65	?
	X.	1938	164,70	11750,00	260	28	0,140	19,8	25	?
	XII.	1951	280,00	20000,00	615	147	0,135	18,5	25	?
	XI.	1938	316,00	22600,00	692	163	0,207	18,5	65	?
Сатурн	VIII.	1908	329,30	23500,00	739	148	0,378	16,5	30	?
	IX.	1914	351,00	25100,00	745	157	0,275	18,0	30	?
	Мимас	1789	3,08	185,00	0 22 37 05	26 45	0,019	12,1	640	1/15000000
	Энцелад	1789	3,95	238,00	1 08 53 07	26 45	0,005	11,6	800	1/6500000
	Тетия	1684	4,88	294,30	1 21 18 26	26 45	0,000	10,5	1300	1/8800000
	Диона	1684	6,26	377,30	2 17 41 10	26 45	0,002	10,7	1100	1/540000
	Рей	1672	8,74	527,00	4 12 25 12	26 42	0,001	10,0	1750	1/250000
	Титан	1655	20,26	1200,00	15 22 41 24	26 07	0,029	8,3	4150	1/4030
	Гиперион	1848	24,56	1500,00	21 06 38 24	26 00	0,119	13,0	500	1/10000000
	Япет	1673	59,03	3000,00	70 07 55 32	16 18	0,028	10,1-11,9	1600	1/400000
Уран	Феба	1893	214,49	12900,00	550 11	174 42	0,166	14,5	320	?
	Миранда	1948	5,25	130,40	33 56	?	?	17,0	?	?
	Ариэль	1851	7,10	191,70	2 12 29 21	97 59	0,007	15,5	950	?
	Умбриэль	1851	10,00	267,10	4 03 27 37	97 59	0,008	15,8	640	?
	Титания	1787	16,41	488,20	8 16 56 27	97 59	0,002	14,0	1600	?
Нептун	Оберон	1787	21,94	585,90	13 11 07 04	97 59	0,001	14,2	1450	?
	Тритон	1846	14,24	353,70	5 21 02 39	139 49	0,000	13,6	5000	1/770
Плутон	Харон	1949	151,00	8000,00	339	3 14	?	19,5	300	?

¹ Таблица составлена С. А. Шорыгинич.

Элементы орбит некоторых малых планет¹ Приложение 6

№	Название	Звездная величина в средней оппозиции	Эпоха	Средняя аномалия M	Расстояние перигелия от узла ω	Долгота восходящего узла Ω	Наклонение i	Угол асцендентсита ψ	Среднее суточное движение n	Большая полуось a
						эклиптика 1950,0				
1	Церера	7 ^m ,4	1940 III 12	11°,5	71°,1	80°,8	10°,6	4°,54	770",92	2,7669
2	Паллада	8,0	1943 X 15	285,0	310,3	173,0	34,8	13,61	769,95	2,7692
3	Юнона	8,7	1942 V 9	164,0	245,5	170,7	13,0	14,83	813,20	2,6702
4	Веста	6,5	1857 I 2	196,3	148,3	104,0	7,1	5,07	977,88	2,3613
5	Астрея	9,9	1900 I 0	337,5	354,3	142,5	5,3	10,93	857,90	2,5766
433	Эрот	10,7	1941VII 25	350,9	178,1	304,0	10,8	12,87	2015,14	1,4581
588	Ахилл	14,2	1941 II 2	17,2	127,8	316,1	10,3	8,62	298,23	5,2116
617	Патрокл	12,6	1940 X 9	353,6	303,4	43,9	22,1	8,13	299,72	5,1943
624	Гектор	13,2	1940XII 19	293,5	177,0	342,2	18,3	1,61	304,72	5,1373
852	Владимена	12,7	1941 VI 19	262,9	281,0	27,6	23,0	15,94	977,22	2,3623
887	Алinda	17,1	1942 I 31	358,0	348,1	111,0	9,0	32,67	886,35	2,5212
944	Гидальго	17,1	1934 XI 12	352,0	57,6	21,4	42,5	40,97	254,03	5,7999
1036	Ганимед	12,5	1941 IV 16	289,8	130,6	216,7	26,2	32,64	815,44	2,6653
1172	Эней	14,4	1942 XI 1	96,1	45,5	246,8	16,7	5,80	299,35	5,1986
1536	1939 SE	16,4	1939 X 19	10,3	169,1	195,7	1,5	11,28	1084,09	2,2044
—	Аполлон	17	1932 IV 25	320,0	284,9	36,1	6,4	34,49	1958,60	1,4861
—	Адонис	19	1946 II 25	22,1	39,5	352,5	1,5	51,19	1284,03	1,9692
—	Гермес	18	1937 XI 6	327,0	90,7	35,4	4,7	28,33	2420,68	1,2904

¹ Данные для таблицы предоставлены И. И. Путилиным.

Список созвездий

Таблица содержит русские названия всех 88 созвездий неба и соответствующие латинские названия (в именительном падеже), принятые международным соглашением в 1922 г. Зодиакальные созвездия означены буквой З, созвездия, находящиеся целиком или большей своей частью к северу от склонения $+40^\circ$, — буквой С, а созвездия, находящиеся к югу от склонения -40° , — буквой Ю. Созвездия Киль (Carina), Компас (Puxis), Корма (Puppis) и Паруса (Vela) прежде считались за одно созвездие Корабль Argo (Argo Navis).

Русские названия	Латинские названия	Примечания	Русские названия	Латинские названия	Примечания
Андромеда	Andromeda	З	Микроскоп	Microscopium	
Близнецы	Gemini	С	Муха	Musca	Ю
Большая Медведица	Ursa Major		Насос	Antilla	Ю
Большой Пес	Canis Major	З	Наугольник	Norma	
Весы	Libra	З	Овен	Arles	З
Водолей	Aquarius	З	Октант	Octans	Ю
Возничий	Auriga	Ю	Орел	Aquila	
Волк	Lupus		Орион	Orion	
Волопас	Bootes		Павлин	Pavo	
Волосы Вероники	Coma Berenices		Паруса	Vela	Ю
Ворон	Corvus		Пегас	Pegasus	С
Геркулес	Hercules		Персей	Perseus	
Гидра	Hydra		Печь	Fornax	Ю
Голубь	Columba		Райская Птица	Apus	З
Гонимые Псы	Canes Venetici		Рак	Cancer	З
Дева	Virgo	З	Резец	Caelum	Ю
Дельфин	Delphinus	С	Рыбы	Pisces	З
Дракон	Draco		Рысь	Lynx	С
Единорог	Monoceros	Ю	Северная Корона	Corona Borealis	С
Жертвенник	Ara	Ю	Секстант	Sextans	
Живописец	Pictor		Сетка	Retriculum	
Жираф	Camelopardalis	Ю	Скорпион	Scorpius	З
Журавль	Grus		Скульптор	Sculptor	Ю
Заяц	Lepus		Столовая Гора	Mensa	Ю
Змееносец	Ophiuchus		Стрела	Sagitta	С
Змея	Serpens		Стрелец	Sagittarius	З
Золотая Рыба	Dorado	Ю	Телескоп	Telescopium	Ю
Индеец	Indus	С	Телец	Taurus	З
Кассиопея	Cassiopeia	Ю	Треугольник	Triangulum	Ю
Киль	Carina		Тукан	Tucana	
Кит	Cetus		Феникс	Phoenix	Ю
Козерог	Capricornus	З	Хамелеон	Chamaeleon	Ю
Компас	Puxis		Центавр	Centaurus	С
Корма	Puppis	Ю	Цефей	Cepheus	С
Крест	Cruz		Циркуль	Circinus	Ю
Лебедь	Cygnus		Часы	Horologium	
Лев	Leo	З	Чаша	Crater	
Летучая Рыба	Volans	Ю	Щит	Scutum	
Лира	Lyra	С	Эридан	Eridanus	
Лисичка	Vulpecula		Южная Гидра	Hydrus	
Малая Медведица	Ursa Minor		Южная Корона	Corona Austrina	Ю
Малый Конь	Equuleus		Южная Рыба	Piscis Austrinus	Ю
Малый Лев	Leo Minor		Южный Треугольник	Triangulum Australe	
Малый Пес	Canis Minor		Ящерица	Lacerta	С

Наиболее яркие звезды 1

Приложение 8

Названия звезд	Координаты 1954,0		Годовое собственное движение μ	Параллакс π	Расстояние		Видимая звездная величина	Спектральный класс	Абсолютная величина	Светимость ($\odot = 1$)
	прямое восхождение α	склонение δ			в световых годах	в парсеках				
α Большого Пса (Сириус)	6 ^h 43 ^m 1	-16°39' 1	1 ^s .32	0 ^s .375	8,7	2,7	-1 ^m .6	A2	-1 ^m .03	23
α Кила (Конюс)	6 22 56	-52 40 ,2	0,02	0,018	180?	55?	-0,9	A5	10,0	0,008
α Центавра	14 36 28	-60 38 ,8	3,68	0,756	4,29	1,3	+0,3	G0	4,6?	5200?
α Лирь (Вега)	18 35 23	+38 44 ,4	0,35	0,123	26,5	8,1	0,1	M	6,1	1,0
α Возничего (Капелла)	5 13 17	+45 57 ,2	0,44	0,073	45	14	0,2	A0	15,4	0,28
α Волонаса (Арктур)	14 13 24	+19 25 ,3	2,29	0,090	36	11	0,2	M1	0,5	0,000052
β Ориона	5 12 20	-8 15 ,2	0,01	0,005?	650?	200?	0,3	K0	0,0	48
α Малого Пса (Процион)	7 36 54	+5 20 ,7	1,25	0,288	11,3	3,5	0,5	G0	9,3	130
α Эридана (Ахернар)	1 36 00	-57 28 ,2	0,09	0,023	140?	43	0,6	M5	+13,0	0,14
β Центавра	14 00 33	-60 09 ,1	0,04	0,016	200?	61	0,9	B8p	+9,8	0,005
α Орла (Альгаир)	19 48 32	+8 44 ,7	0,66	0,198	16,5	5,0	0,9	B5	2,6	5,8
α Ориона (Бетельгейзе)	5 52 41	+7 24 ,0	0,03	0,005	650?	200?	0,9	B1	3,1	0,00044
α Креста	12 24 02	-62 50 ,7	0,05	0,015?	220?	67?	1,4	M2	+2,5	83
α Тельца (Альдебаран)	4 33 17	+16 25 ,1	0,20	0,048	68	12	1,1	B1	5,6?	1300?
β Близнецов (Поллукс)	7 42 30	+28 08 ,4	0,62	0,083	35	11	1,2	B1	2,7	900?
α Девы (Спика)	13 22 46	-10 55 ,3	0,05	0,021	160?	49?	1,2	B1	2,2	600?
α Скорпиона (Антарес)	16 26 35	-26 19 ,9	0,03	0,019	170?	52?	1,2	M4	+2,4?	700?
α Южной Рыбы (Фомальгаут)	22 55 07	-29 52 ,0	0,37	0,144	23	7,1	1,3	A3	+2,1	11
α Лебедя (Денеб)	20 39 52	+45 06 ,9	0,00	0,006?	540?	166?	1,3	A2p	+4,8?	6000?
α Льва (Регул)	10 05 55	+12 11 ,6	0,24	0,039	84	25	1,2	B8	-0,7	140
								K2	+5,6	0,44
								?	+11,0	0,0030

* Таблица составлена С. А. Шорыгиним.

Широты и долготы городов СССР (от Гринвича)
(жирным шрифтом напечатаны названия столиц союзных республик)

	широта	вост. долгота		широта	вост. долгота
Абакан	53°42'	6°5 ^м ,8	Курск	51°44'	2°24 ^м ,8
Александровск-Саха- линский	50 54	9 28,7	Кустанай	53 13	4 14,5
Алма-Ата	43 16	5 07,8	Кутанси	42 15	2 50,8
Анадырь	66 44	11 48,7	Ленинабад	40 17	4 38,5
Архангельск	64 33	2 42,1	Ленинград	59 57	2 01,0
Астрахань	46 21	3 12,2	Липецк	52 37	2 38,4
Ашхабад	37 57	3 53,6	Львов	49 50	1 36,1
Баку	40 21	3 19,4	Магадан	59 35	10 02,8
Батуми	41 40	2 46,5	Махач-Кала	42 59	3 10,0
Белгород	50 36	2 26,3	Минск	53 54	1 50,2
Биробиджан	48 48	8 51,8	Могилев	53 54	2 01,3
Брест	52 06	1 34,9	Москва	55 45	2 30,3
Бухара	39 46	4 16,8	Мурманск	68 59	2 12,2
Вильнюс	54 41	1 41,0	Нальчик	43 30	2 54,4
Витебск	55 10	2 00,8	Нарьян-Мар	67 38	3 32,0
Владивосток	43 07	8 47,5	Нахичевань	39 12	3 01,7
Владимир	56 08	2 41,6	Николаев	46 58	2 07,9
Вологда	59 13	2 39,5	Николаевск-на-Аму- ре	53 08	9 22,9
Воронеж	51 39	2 36,8	Новгород	58 31	2 05,1
Ворошиловград	48 34	2 37,3	Новосибирск	55 01	5 31,7
Выборг	60 43	1 54,9	Новочеркасск	47 25	2 40,4
Ганджа	40 41	3 05,4	Нукус	42 27	3 58,3
Гомель	52 25	2 04,1	Одесса	46 29	2 03,0
Горно-Алтайск	51 57	2 41,2	Орел	54 59	4 53,5
Горький	56 20	2 56,0	Орджоникидзе	43 02	2 58,7
Гродно	53 41	1 35,4	Оренбург	51 45	3 40,4
Днепропетровск	48 28	2 20,3	Охотск	59 21	9 33,2
Енисейск	58 27	6 08,8	Ош	40 32	4 51,2
Ереван	40 14	2 58,0	Пенза	53 11	3 00,1
Житомир	50 15	1 54,6	Пермь	58 01	3 45,1
Запорожье	47 50	2 20,7	Петрозаводск	61 47	2 17,6
Иваново	57 00	2 43,9	Петропавловск- Камчатский	53 00	10 34,9
Йошкар-Ола	44 50	3 11,3	Полтава	49 35	2 18,3
Иркутск	52 16	6 57,1	Пржевальск	42 30	5 13,6
Казань	55 48	3 16,5	Псков	57 49	1 53,3
Калинин	56 52	2 23,6	Рига	56 57	1 36,5
Калининград	54 42	1 22,0	Ровно	50 38	1 41,4
Калуга	54 31	2 25,0	Ростов-на-Дону	47 13	2 38,8
Каменец-Подольск	48 40	1 46,3	Рязань	54 38	2 39,0
Каунас	54 54	1 35,5	Салехард	66 32	4 26,5
Кзыл-Орда	44 50	4 00	Самарканд	39 39	4 27,9
Киев	56 27	2 02,0	Саратов	51 32	3 04,3
Киров	58 36	3 18,7	Свердловск	56 49	4 02,4
Кишинев	47 02	1 55,3	Севастополь	44 37	2 14,1
Коканд	40 32	4 43,2	Симферополь	44 57	2 16,4
Кокчетав	53 16	4 37,4	Смоленск	54 46	2 18,2
Кострома	57 46	2 43,7	Ставрополь	43 02	2 48,0
Красноярск	56 01	6 11,4	Сталинград	48 42	2 58,1
Краснодар	45 03	2 35,8	Сталинабад	38 33	4 35,6
Куйбышев	53 11	3 20,3	Сталинири	42 13	2 55,9
Куляб	37 55	4 39,1	Степанакерт	39 49	3 59,9
Курган	55 26	4 21,3			

Продолжение

	широта	вост. долгота		широта	вост. долгота
Сухуми	43°00'	2°44 ^м ,0	Усть-Каменогорск	49°58'	5°28 ^м ,6
Таганрог	47 13	2 35,8	Уфа	54 43	3 43,8
Таллин	59 26	1 39,0	Фрунзе	42 53	4 58,5
Тамбов	52 44	2 45,8	Хабаровск	48 28	9 00,2
Тарнополь	49 33	1 42,5	Харьков	50 00	2 24,9
Ташауз	41 50	3 59,9	Херсон	46 38	2 10,5
Ташкент	41 18	4 37,2	Челябинск	55 10	4 05,4
Тбилиси	41 42	2 59,2	Чернигов	51 29	2 05,2
Тобольск	58 12	4 33,1	Черновцы	48 18	1 43,8
Томск	56 30	5 39,8	Чита	52 01	7 34,0
Тула	54 12	2 30,5	Щербаков	58 03	2 35,5
Ужгород	48 38	1 29,0	Южно-Сахалинск	46 57	9 31,7
Ульяновск	54 19	3 13,6	Якутск	62 02	8 39,0
Уральск	51 12	3 25,4	Ярославль	57 38	2 39,5

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО АСТРОНОМИИ

ОБЩИЕ КУРСЫ, МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОСОБИЯ И КНИГИ

- С. Н. Блажко, проф., Курс общей астрономии, Гостехиздат, М.—Л., 1947.
И. Ф. Полак, Курс общей астрономии, изд. 7, перераб., Гостехиздат, М.—Л., 1955.
- П. И. Попов и Н. Я. Бугославская, Практикум по астрономии в педагогических институтах, изд. 2, Учпедгиз, М., 1958.
- Б. А. Воронцов-Вельяминов, проф., Сборник задач и упражнений по астрономии (для университетов и педагогических институтов), изд. 4, Гостехиздат, М., 1957.
- М. Е. Набоков, Методика преподавания астрономии в средней школе, изд. 2, Учпедгиз, М., 1955.
- В. А. Шишков, В помощь учителю астрономии в средней школе. Методическое пособие, Учпедгиз, М., 1952.
- Б. А. Воронцов-Вельяминов, проф., Очерки о Вселенной, изд. 3, Гостехиздат, М., 1955.
- Я. И. Перельман, Занимательная астрономия, изд. 9, под ред. П. Г. Куликовского, Физматгиз, М., 1953.
- Г. А. Гурев, Что такое Вселенная, изд. 3, стереотипное, Гостехиздат, М., 1957.
- «Вселенная», Сборник, научный редактор К. П. Станюкович, Госкультпросветиздат, М., 1955.
- В. Г. Фесенков, акад., Современные представления о Вселенной. Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1949.
- П. Г. Куликовский, Справочник астронома-любителя, изд. 2, перераб. и дополн., Гостехиздат, М., 1953.
- В. П. Цесевич, Что и как наблюдать на небе. Руководство к организации и проведению любительских научных наблюдений над небесными светилами, изд. 2, Гостехиздат, М., 1955.
- М. Е. Набоков, Астрономические наблюдения с биноклем [изд. 3], Гостехиздат, М.—Л., 1948.
- Могилко А. Д. Учебный школьный звездный атлас, Учпедгиз, М., 1958 г.
- А. А. Михайлов, Звездный атлас, содержащий для обоих полушарий все звезды до 8,25 величины, с обозначением переменных и двойных звезд, звездных скоплений и туманностей, изд. 2, 20 листов с объяснительным текстом, Гостехиздат, М., 1957.
- «Таблицы по астрономии», под ред. проф. П. И. Попова, изд. 2, исправл. и дополн. Наглядное учебное пособие для средней школы, Учпедгиз, М., 1955.
- «Астрономический календарь» (ежегодник). Переменная часть (Всеобщее астрономическое-геодезическое общество), Гостехиздат, М. (на данный год).
- «Краткий астрономический календарь» (Академия наук Украинской ССР), изд-во Академии наук Украинской ССР, Киев (на данный год).
- «Школьный астрономический календарь», Учпедгиз, М. (на данный год).

К главе II. ОСНОВЫ СФЕРИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

- С. Н. Блажко, проф., Курс сферической астрономии, изд. 2, Гостехиздат, М., 1954.
- М. К. Вентцель, Сферическая астрономия, Геодезиздат, М., 1952.
- М. К. Вентцель, Сферическая тригонометрия, Краткий курс, изд. 2, испр. и доп., Геодезиздат, 1948.
- И. Ф. Полак, проф., Время и календарь, изд. 3, Гостехиздат, М.—Л., 1942.
- В. А. Баринков, проф., Время и его измерение, Изд-во «Правда», М., 1949.
- Б. С. Кузьмин, Основы астрономического метода измерения времени, Гостехиздат, М., 1954.

К главе III. ОСНОВЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

- К. А. Куликов, *Астрономия на службе народного хозяйства*, Гостехиздат, М., 1957.
П. И. Попов, *Общедоступная практическая астрономия*, изд. 4, Физматгиз, М., 1958.
С. Н. Блажко, проф., *Курс практической астрономии*, изд. 3, перераб., Гостехиздат, М.—Л., 1951.
А. П. Белобров, *Мореходная астрономия*, Гидрометеоиздат, Л., 1953.
Н. Я. Кондратьев, *Астрономия в авиации*, Воениздат, М., 1952.
Р. В. Куницкий, *Курс авиационной астрономии*, Воениздат, М., 1949.

К главе IV. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ

- Р. В. Куницкий, *Развитие взглядов на строение солнечной системы*. Краткий исторический очерк, изд. 5, Гостехиздат, М., 1952.
К. Л. Баев, проф., *Создатели новой астрономии*, Коперник, Бруно, Кеплер, Галилей, изд. 2, Учпедгиз, М., 1955.
К. Л. Баев, проф. и В. А. Шишаков, *Творцы астрономии*, ОНТИ, М.—Л., 1936.
Артур Берри, *Краткая история астрономии*, пер. с англ. С. И. Займовского, изд. 2, под ред. и дополн. проф. Р. В. Куницкого, ГИТТЛ, М.—Л., 1946.
Н. И. Идельсон, проф., *Николай Коперник*, Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1943.
Г. Ревзин, *Николай Коперник (1473—1543)*, Изд-во «Молодая гвардия», 1949.
«Николай Коперник» (1473—1543), *Сборник статей к 400-летию со дня смерти*, Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1947.
Джордано Бруно, *Диалоги*, пер. с итал., ред. и вступит. статья М. А. Дынина, Госполитиздат, 1949.
Галилео Галилей, *Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой*, пер. А. И. Долгова, Гостехиздат, М.—Л., 1948.
Г. А. Гурев, *Системы мира от древнейших времен до наших дней*, Изд-во «Московский рабочий», 1950.
Р. А. Гурев, *Коперниковская ересь в прошлом и настоящем. Из истории взаимоотношений науки и религии*, изд. 3, перераб., ГАИЗ, М., 1938.
Н. И. Леонов, *Улугбек — великий астроном XV века*, изд. 2, Гостехиздат, М., 1950.
Т. Н. Кары-Ниязов, действ. член Академии наук Узбекской ССР, *Астрономическая школа Улугбека*, изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1950.
Б. Е. Райков, проф., *Очерки по истории гелиоцентрического мировоззрения в России*, Из прошлого русского естествознания, изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1947.
А. А. Михайлов, проф., член-корр. Академии наук СССР, *Солнечные и лунные затмения*, изд. 3, Гостехиздат, М.—Л., 1951.
В. Т. Тер-Оганезов, *Солнечные и лунные затмения*, изд. 3, дополн., перераб., Госкультпросветиздат, М., 1954.

К главе V. ЗЕМЛЯ

- Ф. Д. Бублейников, *Очерк развития представлений о Земле*, Изд-во Академии наук СССР, М., 1955.
Ф. Д. Бублейников, *Строение и состав Земли*, Воениздат, М., 1950.
А. В. Эдельштейн, *Как создается карта*, Геодезиздат, М., 1953.
К. А. Куликов, *Движение полюсов Земли*, Изд-во Академии наук СССР, М., 1956.
В. Ф. Бончковский, *Внутреннее строение Земли*, Изд-во Академии наук СССР, М., 1953.
А. А. Изотов, *Очерк развития исследования фигуры Земли*, «Физика в школе», 1948, № 5, стр. 3—15.
А. С. Чеботарев, проф., *Геодезия*, ч. I и ч. II, Геодезиздат, М., 1955 и 1949.
П. С. Закалов, *Курс высшей геодезии*, *Сферическая геодезия с основаниями гравиметрии и практической астрономии*, изд. 2, Геодезиздат, М., 1953.
Ф. Н. Красовский, *Руководство по высшей геодезии*, ч. I и ч. II. Избранные сочинения, т. III и т. IV, Геодезиздат, М., 1955.
П. П. Лазарев, акад., *Основы физики Земли*, ГОНТИ, М.—Л., 1939.
Л. В. Сорокин, проф., *Гравиметрия и гравиметрическая разведка*, изд. 2, Гостехиздат, М.—Л., 1951.
А. А. Михайлов, проф., *Курс гравиметрии и теории фигуры Земли*, изд. 2, Редбюро ГУГК, М., 1939.

К главе VI. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА И ОСНОВЫ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ

- Б. А. Воронцов-Вельяминов, проф., Как открывают планеты, ГАИЗ, 1937.
- Г. Н. Дубошин, проф., Введение в небесную механику, ОНТИ, М.—Л., 1938.
- А. Я. Орлов и Б. А. Орлов, Курс теоретической астрономии (Определение орбит планет и комет с помощью счетных машин), ГИТТЛ, М.—Л., 1940.
- А. Д. Дубяго, Вычисление орбит, Гостехиздат, М.—Л., 1949.
- М. Ф. Субботин, Курс небесной механики, т. I, изд. 2, Гостехиздат, Л.—М., 1941, т. II, ОНТИ, Л.—М., 1937, т. III, Гостехиздат, Л.—М., 1949.
- П. С. Кудрявцев, Исаак Ньютон, изд. 2, перераб., Учпедгиз, 1955.
- С. И. Бавилов, акад., Исаак Ньютон, изд. 2, испр. и доп., Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1945.
- Ис. Ньютон, Математические начала натуральной философии, пер. с лат. с примечаниями и пояснениями А. Н. Крылова. Собрание трудов академика А. Н. Крылова, т. VII, Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1936.
- А. А. Штернфельд, Межпланетные полеты, Гостехиздат, М., 1955.
- А. Штернфельд, Искусственные спутники, изд. 2, перераб. и дополн., Гостехиздат, М., 1958.
- А. Штернфельд, От искусственных спутников к межпланетным полетам, Гостехиздат, М., 1957.
- А. А. Штернфельд, Астронавтика, «Физика в школе», 1955, № 6, стр. 7—19.
- Ю. А. Победоносцев, Искусственный спутник Земли, изд-во «Знание», М., 1957.
- В. Г. Фесенков, Проблемы астронавтики, «Природа», 1955, № 6, стр. 11—18.
- М. С. Арлазоров, Константин Эдуардович Циолковский, его жизнь и деятельность, изд. 2, исправл. и дополн., Гостехиздат, 1957.

К главе VII. МЕТОДЫ АСТРОФИЗИКИ

- П. П. Паренаго, Астрономические обсерватории (как изучают небо), Гостехиздат, М., 1953.
- М. С. Навашин, Телескоп астронома-любителя, Гостехиздат, М.—Л., 1949.
- Г. Димитров и Д. Бэкер, Телескопы и принадлежности к ним, пер. с англ. М. С. Навашина, Гостехиздат, М.—Л., 1947.
- И. С. Шкловский, Космическое радиоизлучение, Гостехиздат, М., 1956.
- И. С. Шкловский, Радиоастрономия, изд. 2 дополн., Гостехиздат, М., 1955.
- П. О. Чечик, Радиотехника и электроника в астрономии, Госэнергоиздат, М.—Л., 1953.
- С. Э. Хайкин, Радиоастрономия, изд-во «Знание», М., 1954.
- Б. Ловелл и Дж. Клегг, Радиоастрономия, пер. с англ. Б. М. Чихачева, Изд-во иностр. лит., М., 1953.
- В. А. Альбицкий, В. П. Вязанин, А. Н. Деич, М. С. Зельцер, В. А. Крат, П. В. Мейклер, О. А. Мельников, В. Б. Никонов, В. В. Соколов, Г. А. Шайн, В. В. Шаронов, Курс астрофизики и звездной астрономии, т. I, отв. ред. А. А. Михайлов, Гостехиздат, М.—Л., 1951.
- Б. А. Воронцов-Вельяминов, Курс практической астрофизики, ГИТТЛ, М.—Л., 1940.
- Л. Аллер, Астрофизика, т. I и т. II, перев. с англ. В. С. Бердичевской, Б. А. Макаровой и Д. Я. Марьиной, Изд-во иностр. лит., М., 1955 и 1957.
- М. С. Навашин, Самодельный телескоп-рефлектор, под ред. чл.-корр. Академии наук СССР Д. Д. Максудова, Гостехиздат, М., 1953.
- В. А. Амбарцумян, Э. Р. Мустель, А. Б. Северный, В. В. Соколов, Теоретическая астрофизика, под ред. В. А. Амбарцумяна, Гостехиздат, М., 1952.
- С. Росселанд, Астрофизика на основе теории атома, пер. с нем. С. А. Шорыгина, просмотр. и доп. проф. В. А. Амбарцумяном, ОНТИ, М.—Л., 1936.
- А. А. Белопольский, Астрономические труды, Гостехиздат, М., 1954.
- В. К. Цераский, Избранные работы по астрономии, Гостехиздат, М.—Л., 1953.
- Ю. Г. Перель, Выдающиеся русские астрономы, под ред. чл.-корр. Академии наук СССР С. Н. Блажко, Гостехиздат, М.—Л., 1954.
- Б. А. Воронцов-Вельяминов, проф., Очерки по истории астрономии в России, Гостехиздат, М., 1956.
- В. Н. Ченакал, Очерки по истории русской астрономии. Наблюдательная астрономия в России XVII и XVIII вв., Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1951.
- «Главная астрономическая обсерватория Академии наук СССР в Пулковске» (1839—1953), Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1953.
- П. П. Добронравин, Крымская астрофизическая обсерватория Академии наук СССР, Изд-во Академии наук СССР, М., 1955.
- П. П. Добронравин, Современные проблемы астрофизики, «Природа», 1957, № 3, стр. 11—23.
- С. Э. Хайкин, Радиоастрономия и изучение Вселенной, «Природа», 1956, № 8, стр. 5—14.

К главе VIII. ПЛАНЕТЫ И ИХ СПУТНИКИ

- В. В. Шаронов, доктор физ.-мат. наук, проф., Есть ли жизнь на планетах, Воениздат, М., 1952.
- В. В. Шаронов, доктор физ.-мат. наук, проф., Воздушный океан Земли и планет, Л., 1952.
- Г. А. Тихов, Есть ли жизнь на других планетах, Изд-во «Московский рабочий», 1956.
- А. И. Опарин, и В. Г. Фесенков, Жизнь во Вселенной, Изд-во Академии наук СССР, М., 1956.
- Н. Н. Сытинская, Есть ли жизнь на небесных телах, Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1949.
- Г. Спенсер Джонс, Жизнь на других мирах, пер. с англ. А. К. Федоровой-Грот, под ред. проф. Н. И. Идельсона, Гостехиздат, М.—Л., 1946.
- Фред Уиппл, Земля, Луна и планеты, пер. с англ. Н. И. Поляковой, Гостехиздат, М.—Л., 1947.
- В. А. Бронштэн, Планеты и их наблюдение, под ред. проф. Н. Н. Сытинской, Гостехиздат, М., 1957.
- Н. П. Барабашев, Исследование физических условий на Луне и планетах, Изд-во Харьковского гос. ун-та, Харьков, 1952.
- Ф. Ю. Зигель, Загадка Марса, изд. 2, Детгиз, М., 1956.
- Ж. Вокулер, Физика планеты Марс, перев. с франц. Ю. А. Рябова, под ред. В. В. Шаронова, Изд-во иностр. литер., М., 1956.
- В. В. Шаронов, Природа планет, Физматгиз, М., 1958.
- В. В. Шаронов, проф., Марс, Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1947.
- П. Г. Куликовский, М. В. Ломоносов — астроном и астрофизик, Гостехиздат, М.—Л., 1950.
- А. Морозов, Михаил Васильевич Ломоносов, 1711—1765, изд. 2, Лениздат, 1952.
- М. В. Ломоносов, Избранные философские произведения, под общей ред. и с предисл. Г. С. Васецкого, Госполитиздат, 1950.
- М. В. Ломоносов, Полное собрание сочинений, т. IV, Труды по физике, астрономии и приборостроению, Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1955.
- Е. Л. Кринов, Планеты-карлики, Гостехиздат, М., 1956.
- «Атмосфера Земли и планет». Сборник статей под ред. Д. А. Койпера, пер. с англ., под ред. и с предисл. И. С. Шкловского, Изд-во иностр. литер., М., 1951.
- Н. Н. Сытинская, Луна и ее наблюдение, Гостехиздат, М., 1956.
- А. В. Хабаков, Об основных вопросах истории развития поверхности Луны, Географгиз, М., 1949.
- Н. Н. Сытинская, Великое противостояние Марса, Гостехиздат, 1956.

К главе IX. КОМЕТЫ. МЕТЕОРЫ И МЕТЕОРИТЫ

- С. К. Всехсвятский, Малые тела солнечной системы, Гостехиздат, М., 1958.
- Ф. Ю. Зигель, Кометы, изд. 2, Гостехиздат, М., 1955.
- С. В. Орлов, проф., Природа комет, изд. 2, Изд-во Академии наук СССР, М., 1958.
- В. В. Федьнский, Метеоры, Гостехиздат, М., 1956.
- Е. Л. Кринов, Метеориты, Физматгиз, М., 1958.
- Е. Л. Кринов, Гигантские метеориты (Тунгусский и Сихотэ-Алинский), Изд-во Академии наук СССР, М., 1952.
- Е. Л. Кринов, Тунгусский метеорит, Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1949.
- Е. Л. Кринов, Основы метеоритики, Гостехиздат, М., 1955.
- Ф. Ю. Зигель, Федор Александрович Бредихин, его жизнь и деятельность, Гостехиздат, М., 1957.
- Ф. А. Бредихин, Этюды о метеорах, Изд-во Академии наук СССР, М., 1954.

К главе X. СОЛНЦЕ

- П. И. Попов, проф., Солнце и Земля, Воениздат, М., 1951.
- С. И. Вавилов, Глаз и Солнце (О свете, Солнце и зрении), изд. 7, Изд-во Академии наук СССР, М., 1956.
- А. Г. Масевич, История Солнца, изд. 2, перераб. и дополн., Изд-во «Молодая гвардия», 1955.
- В. В. Шаронов, Солнце и его наблюдение, изд. 2, Гостехиздат, М.—Л., 1953.
- А. Б. Северный, Физика Солнца, Изд-во Академии наук СССР, М., 1956.
- М. Вальдмайер, Результаты и проблемы исследования Солнца, пер. с нем. Н. Б. Егоровой, Изд-во иностр. литер., М., 1950.
- Н. Н. Калитин, Лучи Солнца, Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1947.
- К. А. Тимирязев, Солнце, жизнь и хлорофилл. Сочинения, т. I и т. II, Сельхозгиз, 1937.
- Б. В. Петухов, канд. техн. наук, Солнечная энергия и возможности ее использования, Изд-во «Знание», М., 1952.
- М. С. Эйгенсон, М. Н. Гневашев, А. И. Оль, Б. М. Рубашев, Солнечная активность и ее земные проявления, под ред. М. С. Эйгенсона, Гостехиздат, М.—Л., 1948.

И. С. Шкловский, Солнечная корона, Гостехиздат, М.—Л., 1951.
 В. А. Бронштейн, Е. Я. Бугославская, Н. Я. Бугославская,
 С. К. Всехсвятский, М. М. Дагаев, М. М. Лепский, А. А. Михайлов,
 С. И. Сивков, В. Т. Тер-Оганезов, Солнечные затмения и их наблюдения,
 К солнечному затмению 10 июня 1954 г., Гостехиздат, М., 1954.

К главе XI. ОБЩИЙ ОБЗОР И ФИЗИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ЗВЕЗД

П. П. Паренаго, В мире звезд, Гостехиздат, М., 1957.
 В. Н. Комаров, Движения звезд, Гостехиздат, М., 1957.
 Т. А. Агекян, Звездная Вселенная, изд. 2, Гостехиздат, М., 1955.
 П. П. Паренаго, проф., Курс звездной астрономии, изд. 3, перераб. и дополн.
 Гостехиздат, М., 1954.
 В. В. Соболев, Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет, Гостехиздат, М., 1956.
 С. Чандрасекар, Введение в учение о строении звезд, пер. с англ. проф.
 В. П. Цесевича, под ред. и с вводящей статьей проф. А. Б. Северного, Изд-во иностр. лит., М., 1950.

К главе XII. ДВОЙНЫЕ, ПЕРЕМЕННЫЕ И НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ. ДИФФУЗНАЯ МАТЕРИЯ

В. П. Цесевич, чл.-корр. Академии наук УССР, Переменные звезды и их значение для изучения Вселенной, Изд-во Академии наук Украинской ССР, Киев, 1949.
 П. П. Паренаго и Б. В. Кукаркин, Переменные звезды и способы их наблюдения, изд. 2, исправл., Гостехиздат, М.—Л., 1947.
 Э. Р. Мустель, доктор физ.-мат. наук, Новые и сверхновые звезды, Изд-во «Правда», М., 1951.
 Б. А. Воронцов-Вельямнов, проф., Новая звезда в созвездии Геркулеса, ОНТИ, М.—Л., 1935.
 Б. В. Кукаркин и П. П. Паренаго, Физические переменные звезды, ОНТИ, М.—Л., 1938.
 Д. Я. Мартынов, Затменные переменные звезды, ОНТИ, М.—Л., 1939.
 М. С. Зверев, Б. В. Кукаркин, Д. Я. Мартынов, П. П. Паренаго,
 Н. Ф. Флорья, В. П. Цесевич, Методы изучения переменных звезд, Гостехиздат, М.—Л., 1947.
 Г. А. Шайн, акад., В. Ф. Газе, Диффузные газовые туманности, «Природа», 1953, № 3, стр. 19—26.

К главе XIII. НАША ГАЛАКТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА И ДРУГИЕ ГАЛАКТИКИ

Е. К. Харадзе, В глубинах Вселенной, изд-во «Знание», М., 1956.
 П. П. Паренаго, Строение Вселенной, Госкультпросветиздат, М., 1949.
 В. Я. Струве, Этюды звездной астрономии, Изд-во Академии наук СССР, М., 1956.
 Б. А. Воронцов-Вельяминов, Спиральная структура Галактики, «Астрономический журнал», 1953, вып. 1, стр. 37—49.
 Б. Бок и П. Бок, Млечный Путь, пер. с англ. В. Л. Авербаха, под ред. проф.
 П. П. Паренаго, Гостехиздат, М.—Л., 1948.
 Б. В. Кукаркин, Исследование строения и развития звездных систем на основе изучения переменных звезд, Гостехиздат, М.—Л., 1949.
 Г. А. Шайн, Поляризация света звезд, магнитное поле и спиральная структура Галактики в области Стрельца, «Астрономический журнал», 1956, вып. 4, стр. 469—473.
 Г. А. Шайн, Ориентация общего магнитного поля Галактики в окрестностях Солнца относительно галактического экватора, «Астрономический журнал», 1957, вып. 1, стр. 3—7.
 С. Б. Пикельнер, Магнитные поля в Галактике, «Природа», 1956, № 12, стр. 27—34.

К главе XIV. КОСМОГОНИЯ

Фридрих Энгельс, Диалектика природы, Госполитиздат, 1955.
 В. И. Ленин, Материализм и эмпириокритицизм, Госполитиздат, 1952 (или Социниения, изд. 2 или 3, т. XIII; изд. 4, т. XIV).
 М. Ф. Субботин, проф., член-корр. Академии наук СССР, Происхождение и возраст Земли, изд. 3, перераб., Гостехиздат, М.—Л., 1951.
 Б. Ю. Левин, Происхождение Земли и планет, изд. 2, дополн., Гостехиздат, М., 1956.
 Б. А. Воронцов-Вельяминов, проф., Происхождение небесных тел, изд. 3, перераб., Воениздат, М., 1951.
 Н. П. Барабашов, О происхождении Земли и других небесных тел (Краткий очерк), Госкультпросветиздат, М., 1955.

- В. Г. Фесенков, Происхождение и развитие небесных тел по современным данным, Изд-во Академии наук СССР, М., 1953.
- П. Лабереи, Происхождение миров, пер. с франц. Ю. А. Рябова, под ред. Э. Кольмана, Гостехиздат, М., 1957.
- Екатерина Стогова, История одной гипотезы, изд-во «Молодая гвардия», 1955.
- Н. Н. Сытнинская, Современная наука о происхождении и развитии небесных тел, Изд-во Академии педагогических наук РСФСР, М., 1956.
- В. А. Амбарцумян, Эволюция звезд и астрофизика, Изд-во Академии наук Армянской ССР, Ереван, 1947.
- В. А. Амбарцумян, Проблемы происхождения звезд, «Природа», 1952, № 9, стр. 8—18.
- В. А. Амбарцумян, Образование звезд и звездные ассоциации, «Физика в школе», 1952, № 5, стр. 6—9.
- О. Ю. Шмидт, акад., Четыре лекции о теории происхождения Земли, изд. 3, дополн., Изд-во Академии наук СССР, М., 1957.
- Ц. Пэйн-Гапошкина, Рождение и развитие звезд, пер. с англ. Б. А. Воронцова-Вельяминова, Изд-во иностр. литер., 1956.
- О. Струве, Эволюция звезд, Данные наблюдений и их истолкование, пер. с англ. А. Г. Масевич, Изд-во иностр. литер., 1954.
- Труды Первого совещания по вопросам космогонии 16—19 апреля 1951 г., Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1950.
- Труды Второго совещания по вопросам космогонии 19—22 мая 1952 г., Изд-во Академии наук СССР, М.—Л., 1953.

УКАЗАТЕЛЬ ИМЕН

А

Адамс 172.
Акимов М. А. 90.
Амбарцумян В. А. 406, 421,
425, 426
Аристарх Самосский 9.
Аристотель 8—10.
Архимед 9.
Астапович И. С. 251.

Б

Бааде 407.
Баев К. Л. 271.
Баклунд О. А. 257.
Барабашев Н. П. 232.
Белопольский А. А. 15, 206,
232, 285, 299.
Белявский С. И. 247.
Бессель 123, 141, 337
Бируни 10, 137.
Блажко С. Н. 313.
Браге Тихо 109, 110, 252.
Брадлей 124.
Бредихин Ф. А. 15, 258—
260, 262, 265, 273.
Бруно Джордано 10, 106,
107.
Брюс Я. В. 12.
Бугославская Е. Я. 312,
315.
Бэкон 419.
Бюффон 427.

В

Вахман 258.
Вейнберг Б. П. 323.
Вейцекер 433.
Вольф 297.
Воронцов-Вельяминов Б. А.
359, 389, 421, 425.
Всехсвятский С. К. 265.

Г

Галилей Галилео 10, 12, 13,
107—109, 119.
Галле 172, 173
Галлей 253, 254, 333.
Ганский А. П. 284, 311.
Гельмгольц 422
Гендерсон 123, 337.
Гераклит 8.

Гершель Вильям 14, 171, 190,
230, 245, 325, 326, 364,
398, 399.
Гиппарх 9—11, 112, 174, 197,
377.
Глазенап С. П. 71.
Грегори 190.
Григорий XIII 52.
Гудрайк 365.
Гюйгенс 232, 245.

Д

Дарвин Дж. 236.
Деламбр 141.
Деландр 232.
Демокрит 398.
Джинс 431, 432, 435.
Дионисий Малый 53.

Ж

Жданов А. А. 419.
Жолио-Кюри 440.

И

Изотов А. А. 141.
Ионнисiani Б. К. 191.

Й

Йолли 150.

К

Калиняк А. А. 412.
Калитин Н. Н. 294.
Кант 14, 428.
Кассегрен 187.
Кеплер 12, 109—112, 154, 169,
252, 253.
Килер 232.
Кирхгоф 286.
Клаузуус 435.
Клеро 144.
Ковалевская С. В. 233.
Колумб П.
Коперник 11, 12, 101, 102,
106, 112, 117.
Красовский В. И. 412.
Красовский Ф. Н. 141, 142,
149, 437.
Кукаркин Б. В. 381, 389,
407, 421.
Кулик Л. А. 269.
Кэвендиш 150.

Л

Лаплас 14, 155, 428—431.
Лебедев П. Н. 216, 268.
Леверье 172, 173, 178, 230.
Лексель А. И. 171.
Ленин В. И. 9.
Лино 313.
Липский Ю. Н. 237.
Ловелл 173, 174.
Ломоносов М. В. 13, 14, 117,
146, 190.
Лютер 12, 106.

М

Магеллан 11, 48.
Майер 427.
Максвелл 216.
Максудов Д. Д. 188.
Менделеев Л. И. 213.
Маркс 6.
Масевич А. Г. 427.
Мессье 401.
Михайлов А. А. 281.
Михельсон В. А. 294.
Молоденский М. С. 146.

Н

Насирэддин Туси 10.
Никонов В. Б. 412.
Ньюком 178.
Ньютон Исаак 12, 14, 119,
139, 154, 155, 158, 159, 169,
174, 187, 190, 252, 253, 368.

О

Орлов С. В. 259, 265.
Оснандр 103.

П

Павлов А. П. 239.
Павлов Н. Н. 81.
Папалекси Н. Д. 213.
Паренато П. П. 259, 387.
Парийский Н. Н. 422.
Перевощников Д. М. 15.
Петр I 12, 13, 53.
Пианци 246.
Пифагор 8.
Птолемей 10, 19, 100, 101,
103, 110, 112.

Р

Реселл 432.
Рише 143.
Роуланд 287.
Румовский С. Я. 14.

С

Сент-Илер 90.
Скалiger 54.
Скиапарелли 228.
Созиген 51.
Сомнер 90.
Спирин И. Т. 6.
Струве В. Я. 14, 15, 89, 123,
140, 326, 337, 364, 399.
Струве О. Л. 363.

Т

Тимирязев К. А. 277.
Тихов Г. А. 226, 229.

Трофимов К. Г. 323.

У

Улуг-бек 10.

Ф

Фабриций 295.
Федоров Е. К. 144.
Фесенков В. Г. 237, 251,
269, 313, 427, 433.
Фуко 120, 121.

Х

Хэйфорд 140, 141.
Хэл 291.

Ц

Цераский В. К. 15.

Ч

Чеботарев Г. А. 179.

Ш

Шайн Г. А. 351, 363, 383.
Швабе 297.
Швассман 258.
Шкловский И. С. 314.
Шмидт О. Ю. 433—435.
Штернберг П. К. 15.

Э

Эйлер Л. 152, 155.
Эйнштейн 179, 355, 419.
Энгельс 6, 7, 11, 12, 14, 102,
173, 428, 432, 435, 440
Энке 257.
Эпинус 190.
Эратосфен 136, 137.

УКАЗАТЕЛЬ ПРЕДМЕТОВ

А

Аберрация объектива сферическая 185.
 — — хроматическая 185, 187.
 — света 88, 89, 122, 124, 125, 177.
 Адонис 248, 441.
 Азимут 25, 54, 76.
 Аквариды 275, 276.
 Актинометр 293, 294.
 Альголь 374.
 Алиада 73, 94.
 Алинда 441.
 Альдебаран 21, 443.
 «Альмагест» Птолемея 10, 18, 100.
 Альпы 238.
 Альтаир 340, 443.
 γ Андромеды
 Аномалии силы тяжести 97, 147, 148.
 Аномалия планеты истинная 166.
 Антарес 328, 357, 362, 443.
 Антиапекс 336.
 Апеко 335.
 Апеннины 238.
 Аполлон 441.
 Ариэль 246, 440.
 Арктур 328, 340, 362, 443.
 Астероиды 246—251, см. также *Планеты малые*.
 Астрея 441.
 Астрограф 87, 201.
 Астрология 7.
 Астрометрия 16, 84, 89.
 Астрономическая единица 112, 437.
 — ориентировка 5.
 Астрономические методы 6.
 — наблюдения 5, 6, 9, 22, 65, 97, 183.
 — обсерватории 5, 13, 40, 78, 82, 83, 181, 193, 200—204, см. также *Обсерватории*.
 — пункты 14, 97.
 Астрономический календарь (ежегодник) 16, 77, 168.
 Астрономия 5—17.
 — авиационная (воздушная) 6, 16, 25, 90.
 — звездная 17.

— мореходная 16, 25, 90.
 — практическая 16, 54, 63—97.
 — сферическая 16, 18—64.
 — теоретическая 16, 43, 167.
 Астрометроскопия 182.
 Астрофизика 17, 180—217.
 Астрофотография 182, 189, 190, 193—195.
 Астрофотометрия 182, 195, 196.
 Ахернар 443.
 Ахондриты 271.
 Ахилл 441.

Б

Базис 138.
 Башенный телескоп 280.
 Белые ночи 63, 64.
 Бетельгейзе 328, 340, 341, 354, 357, 443.
 Бинокль 187.
 Биэлиды 275.
 Блеск 197.
 Ближайшая Центавра 338.
 Блинк-микроскоп 194, 201.
 Болид 265—272.
 ξ Большой Медведицы.
 «Боннское обозрение» 90.

В

Вега 15, 28, 175, 328, 362, 443.
 Венера 7, 14, 94, 98, 130, 105, 109, 117, 179, 218—221, 222—224, 429, 431, 438, 439.
 Верньер 73, 74.
 Вертикаль 24.
 Веста 441.
 Весы Юлиа 150.
 — крутильные 150.
 Видимое годовое движение Солнца 32—38.
 Видимые движения планет 98—100.
 — места звезд.
 Вадилена 247, 441.
 Возмущения 171.
 ξ Возничего.
 Восход светил.
 Вращение Галактики 409—413.

— Земли 119—122.
 Времена года 35, 37—39.
 Время всемирное 44—48.
 — декретное 44—48.
 — гражданское 42.
 — звездное 39—42.
 — истинное солнечное 70, 71.
 — местное 46.
 — поясное 44—48.
 — солнечное 39, 41—44.
 — среднее 42, 68.
 Вселенная 8, 9, 16, 18, 101, 106, 288, 289, 435.
 Всесоюзное астрономо-геодезическое общество 276.
 Высота 24, 25.
 — полюса мира над горизонтом 28, 77.
 — светила 54.
 Вычисление орбит 168, 169.
 — эфемерид 168, 169.

Г

«Газовый хвост Земли» 251.
 Галактика 327—419, 425.
 Галактики 413—419.
 Галактическая концентрация 400, 401.
 Ганимед 243, 440, 441.
 Гелиоцентрическая система мира см. *Система Коперника*.
 Гелиоцентрическое мировоззрение 106—109.
 Геминиды.
 Географическое место светила 91.
 Геодезический знак 139.
 — сигнал 139.
 Геодезия 6, 25, 96, 97, 143, 148, 149.
 Геоид 142, 149.
 Геоцентрическая система мира см. *Система Птолемея*.
 Гермес 247, 248, 250, 441.
 Гизды 406.
 Гидальго 247, 248, 441.
 Гиперион 440.
 Гипотеза Вейцекера 433.
 — Джинса 431, 432.
 — Капта 428.
 — Лапласа 428—431.

— В. Г. Фесенкова 433.
— О. Ю. Шмидта 433—435.
Главное управление геодезии и картографии 97.

Гномон 68.
Гномоническая проекция 272.
Год высокосный 51, 52.
— григорианский 53.
— драконический 132, 133.
— звездный 49.
— календарный 52.
— простой 51, 52.
— сидерический
— тропический 49—51.
— юлианский 52.
Горизонт искусственный 84, 437.
— математический (истинный) 23.
— физический (видимый) 23.
Горизонтальная плоскость 22, 23.

Горные цепи на Луне 238.
Гороскоп 7.
Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга 83, 203, 281.

Гравиметр 146.
Гравиметрическая съемка 149.
Гравиметрия 6, 96, 143, 148, 149.
Гравитационная постоянная 150, 151.
Гравитационный вариометр 146.
Градусные измерения 135, 137, 139—141.

Д

Давление света 216.
Дальность видимого горизонта 135.
Движение планет попятное 98.
— — прямое 98.
— — солнечной системы.
— — эллиптическое.
Υ Девы 367.
Деймос 244, 440.
Демаркационная линия.
Денеб 362, 443.
Деферент 100.
Диаграмма «спектр — светимость» 357—361, 389, 426.
Диона 245, 440.
Диффузная материя 424—427.
Долгота галактическая 399, 400.
— географическая.
— географическая 299, 44—48, 81—84.
— эклиптическая 39.
Дракониды 273, 275.

Е

Европа 245, 440.

З

Задача трех тел 169—171.
Закон (формула) Вина 205, 293.
— всемирного тяготения

Ньютона 154—179.
— Планка 209, 302.
— психофизиологический Вебера — Фехнера 197.
— Стефана — Больцмана 205, 295, 352.
Законы излучения 205, 206.
— Кеплера 109—112, 156, 157, 159—163, 169, 235, 268, 410.
Заход светила 59, 60, 66.
Звезд абсолютные величины 338—340.
— атмосферы 350, 351.
— внутреннее строение 424.
— диаметры 351—354.
— истинные места 89.
— Источники энергии 422—424.
— лучевые скорости 335.
— массы 356, 357.
— плотности 356, 357.
— показатели цвета 341, 342.
— светимости 338—340.
— собственные движения 333—335.
— спектры 328—333.
— температуры 346—349.
— физическое строение 325.
— цвета 341, 342.
— число 326—328.
Звезда Барнарда 338, 340
— Кайпера 354, 356.
— ван Маанена 362.
Звездная величина болометрическая 196.
— — визуальная 196.
— — фотографическая 196.
— — фотоэлектрическая 196.
Звездные ассоциации 404, 405, 425.
— карты 27, 28, 54.
— каталоги 27, 28, 89.
— скопления 401—406.
— — движущиеся 406.
— — рассеянные 401, 404—406.
— — шаровые 401—404.
Звездный атлас 327.
Звезды 325—357.
— бело-голубой последовательности 360.
— белые карлики 353—356, 360, 423, 424.
— визуально-двойные 356, 364—366, 368—370, 377.
— гиганты 353, 360.
— двойные 364—376.
— затменно-двойные 363, 365, 373—375.
— карлики 360.
— новые 364, 378, 379, 383—389.
— переменные 364, 377—383; см. также *Переменные звезды*.
— сверхгиганты 360.
— сверхновые 386—389.
— спектрально-двойные 366, 370—373.
— субкарлики 330, 408.
— типа Вольфа-Райе 333, 345, 350, 360, 386, 389.
Земли внутреннее строение 151—153.
— вращение 19, 28, 29, 119—122, 363.
— масса 149—151.
— плотность 149—151.

— размеры 136, 137.
— сжатие 139.
— Форма (фигура) 141—143.
— шарообразность 134, 135.
Земля 5, 6, 8, 9—11, 13, 17, 37, 38, 41, 62, 81, 88, 103, 104, 115, 116, 127, 129, 130, 131, 133—153, 155, 165, 169, 174—176, 179, 198, 210, 212, 213, 218—221, 222, 224, 227, 274, 429, 431, 438, 439.
Земной сфероид 139—141.
Зенит 22.
Зенитное расстояние 24, 25, 75, 76.
Зодиак 33.
Зодиакальный свет 251.
Зрительная труба 13.

И

Искусственные спутники Земли 322.
Использование солнечной энергии 322—324.
История астрономии 6—16.

К

Календарь 49—53.
— григорианский 52.
— лунно-солнечный 50, 54.
— лунный 7, 50, 54.
— солнечный 7, 50—52.
— юлианский 7, 51—53.
Каллисто 245, 440.
Канопус 362, 443.
Капелла 20, 328, 362, 365, 443.
Картография 96, 97.
Υ Кассиопеи 345.
Кастор 370.
Квадратура 100, 126.
Кольцевые горы на Луне 237.
Кольца Сатурна 232, 233.
Комета Аренда — Ролана 262.
— Белого (Биззлы) 257, 264, 275.
— Галлея 252, 254, 256, 257, 264, 276.
— Донати 255, 262.
— Морхауза 261, 262.
— Поис — Виннае 276.
— Швассмана — Вахмана 258.
— Энке — Баклунда 254, 257.
— 1680 I 276.
Кометы 14, 19, 252—265, 272—276.
— голова 255, 263.
— происхождение 262—265.
— распад 262—265.
— строение 255, 256.
— хвост 216, 255, 259, 262, 264.
— ядро 256, 263.
Т Компаса 387.
Космогония 17, 420—436.
Космология 17, 418.
Координаты см. *Системы координат*
«Коридоры видности» 409.
Коронграф 279.
Крабовидная туманность 390.
«Красное смещение» 417, 418.
Крест нитей 72.
Кривая блеска 374, 375, 379,

380, 382, 383, 385, 387.
— лучевых скоростей 372, 373.
— «масса — светимость» 356, 357, 361.
— период — светимость» 381.
Круг высоты 57.
— равных высот 91, 92.
— склонения 26, 57.
Кульминации 23, 39, 68.

Л

α Лебеда 329.
γ Лебеда 382.
61 Лебеда 123, 337.
Леониды 274, 275.
Летосчисление 53.
Лимб 73, 74, 94, 95.
Линия апсид 112.
— изменения даты 48, 49.
β Лиры 375, 376.
Люманая труба 73.
Луна 7, 8, 19, 51, 54, 59, 66, 67, 82, 94, 114—117, 125—127, 129—131, 133, 155, 174, 176, 183, 187, 198, 204, 213—221, 234—244, 440.
Лунные возмущения 178.
— затмения 8, 127—133.
— кратеры 237, 240, 241.
— моря 237, 239, 240, 244.
Луны альбедо 223.
— вращения 234.
— движение 178.
— либрация 235, 236.
— температура поверхности 236, 237.
Лучевая скорость 206, 211—213.
Лучевые системы на Луне 237.

М

Магеллановы Облака 380.
Марс 7, 98—100, 110, 117, 179, 218—224, 429, 431, 438, 439.
Марс атмосфера 227, 228.
— великое противостояние 225.
— каналы 228, 229.
— климат 227, 228.
— материи 225.
— моря 225.
— полярные шапки 226.
— физические условия.
Маятник оборотный 145.
— Фуко 120—122.
Маятниковые приборы 143.
Межзвездная среда 15, 396, 397, 407, 425.
Межзвездный газ 413.
Мениск 188.
Менисковый телескоп 188, 191.
Меридиан 57, 68, 69.
Меридианный круг 84—86, 201, 365.
Меркурий 7, 98—100, 109, 178, 179, 218—221, 223, 245, 429, 431, 438—440.
Мерцание звезд 63, 64.
Местная система 409, 412.
Месяц драконический 133.
— сидерический 125, 127, 427.
— синодический 50, 126, 127, 437.
Метеорит Сихотэ-Алинский

269, 270.
— Тунгусский 268.
Метеориты 265—272.
Метеорное тело 265, 266.
Метеорные потоки 272—276.
Метеорный след 267.
Метеры 19, 213, 265—272, 276.
Микрофотометр 200, 201.
Микрометр кольцевой 88.
— нитяной 74, 87.
— регистрирующий 80.
Мимас 440.
Миранда 246, 440.
Млечный Путь 14, 15, 21, 108, 109, 251, 325, 390, 398, 399, 401, 402, 409, 412, 413.
Моря на Луне 237, 238.
— — на Марсе 225.

Н

Надир 22.
Небесная механика 16, 154—179.
— параллель 25, 27.
— сфера 19, 22—25, 27, 39, 66.
«Небулий» 394.
Нептун 98—100, 171—174, 218—221, 229, 428, 431, 438—440.
Нереида 246, 440.
Новолуние 125.
Новый стиль 52, 53.
Нонниус см. *Верньер*.
Нутация 174, 175, 225, 226.

О

Оберон 246, 440.
Обсерватории:
Абастуманская 203, 287.
Алма-Атинская 203.
Бюраканская 203.
Киевская 203, 280.
Крымская астрофизическая 203, 280, 307.
Маунт Вильсон 190, 287.
Московская 15, 203.
Одесская 203.
Парижская 12.
Петербургская 12, 14.
Пулковская 14, 81, 89, 123, 186, 190, 192, 202, 203, 206, 267, 279, 281, 299, 306, 307, 313, 320, 326, 364.
Симеизская 203, 247.
Сталинибадская 203.
Ташкентская 280.
Харьковская 203, 280.
Объектив 182.
Объективная призма 208, 209.
Окуляр 183, 194.
Оппозиция 99.
Опделение масс планет и Солнца 164, 165.
— размеров Солнца, Луны и планет 118, 119.
— расстояний до Луны и Солнца 114—118.
Ориентировка 65.
Ось мира 23.
— полярная (часовая) 86, 87 — склонения 86.
Открытия Нептуна и Плутона 171—174.
Ошибка эксцентриситета 75.

П

Падлада 441,

Параллактический треугольник 57—59.
— угол 58—68.
Параллакс 123, 124.
— годичный 122—124.
— горизонтальный 113—116, 118.
— Луны 115—129.
— Солнца 118, 281.
— суточный 112—114.
Параллаксы звезд спектральные 340, 341.
— — тригонометрические 336—338, 341.
Параллактическое смещение 113, 114.
Парсек 338.
Пассажный инструмент 40, 80, 81, 201.
Патрокл 441.
Первая четверть 125.
Первый вертикал 24.
Переменные звезды 15.
— — долгопериодические 382, 383.
— — затменные, см. *Звезды затменно-двойные*.
— — неправильные 383.
— — полуправильные 383.
Персеиды 274.
Перемещение северного полюса 152.
Перигелий 41.
Планеты 19, 98—133, 204, 218—233, 427.
— верхние 105.
— малые 99, 246—251.
— нижние 98.
Плутон 98—100, 171—174, 218—221, 233, 427, 428, 437, 439.
Позиционные линии 92, 93.
Позиционный круг 91.
Показатель цвета 209, 210, 341, 342.
Покрытие звезд Луной 236, 237.
Полярный день 35, 36.
Полярная ночь 36, 62.
Поллукс 341, 443.
Полнолуние 125, 243.
Полюсы мира 20, 23, 24.
Полярная звезда 19—21, 31, 67, 68, 77, 175.
Полярные круги 36.
— сияния 14, 318.
Понижение горизонта 95.
Поправка часов 68, 69, 78—80, 84.
Последняя четверть 125.
Постоянная аберрации 437.
— Гаусса 437.
— нутации 437.
— рефракции 61.
— Стефана 205.
— солнечного параллакса 437.
Правило Тициуса и Боде 172, 173, 427.
Предварение равноденствий см. *Прецессия*.
Прецессия 9, 37, 49, 88, 174, 175, 437.
Приливы и отливы 175—178.
Принцип Доплера — Физо 118, 122, 205, 206, 211, 212, 235, 387, 417.
Проксима 123, 337, 338.
Проницающая сила 184.
Противосияние 251.

Противостояние 99, 126, 223, 313.
Прохождение Венеры по диску Солнца 296.
Процион 212, 341, 362, 443.
Прямое восхождение 28, 40, 54, 84—86.

Р

Равноденствие весеннее 32, 34, 35, 37, 52.
— осеннее 34, 37.
Радант 273.
Радиоастрономия 17, 182, 213—215.
Радиометоды в астрономии 213—216.
Радиометр 195, 196.
Радиотелескопы 202, 213—215.
Разрешающая сила 184.
Регул 443.
Редукция 88.
Рефлектор 181, 184, 187—191, 193, 201.
Рефрактор 181, 185—189, 192, 201.
Рефракция 36, 60—63, 88.
— астрономическая 60—62, 88.
— средняя 61.
Рей 245, 440.
Ригель 340, 362.
Ритмические сигналы 83, 145.

С

Сарос 133.
Сатурн 7, 98—100, 171, 218—221, 229, 231—233, 428, 431, 438—440.
Светлые лучи на Луне 239, 243.
Светосила 182.
Светофильтр 190.
Секстант 94—96.
Серия Бальмера 212, 305.
Сетка нитей 80, 127.
Сжатие Земли 437.
Сигналы точного времени 5.
Сидериты 271.
Сидерический период обращения 104, 105, 125.
Сизигии 126.
Синдинамика 262.
Синодический период обращения 100, 104, 105.
Синхрона 260.
Сириус 18, 28, 328, 338, 340, 341, 343, 443.
Система Коперника 13, 101—109, 337.
— Птолемея 100, 101, 110.
Систематические ошибки 88.
Системы координат:
 галактическая 399, 400.
 горизонтальная 24—26.
 экваториальные 26—28.
 эклиптическая 34, 38, 39.
Склонение 26, 28, 54, 84—86.
Служба времени 15, 82—84, 201.
— Солнца 15, 203, 321.
Соединение Луны с Солнцем 126.
— планеты с Солнцем 98.
Созвездия 18, 19.
Солнечная постоянная 223.
— система 98—133, 427, 428.
Солнечное затмение 127—133.

— кольцеобразное 129.
— — полное 129, 280, 281, 313.
— — частное 129.
— кольцо 69—71.
Солнечные часы 69—71.
Солнца атмосфера 286—289.
— возраст 420—421.
— вращение 282—286.
— всплески 316.
— годовое движение 32—38.
— гранулы (грануляция) 284.
— значение изучения 277, 278.
— корона 277, 278, 285, 310, 316.
— масса 281, 282.
— обрабатывающий слой 304, 306.
— общий вид 282—286.
— пикки 316.
— протуберанцы (выступы) 285, 308—311.
— пятна 284, 285, 295—302, 306.
— радионизлучение 315, 316.
— размеры 281, 282.
— расстояние 281, 282.
— спектр 286—292.
— вспышки 303, 304.
— протуберанцев 306—310.
— — пятен 298.
— — хромосферы 303—304.
— — фотосферы 298.
— спиккулы 306.
— температура 292—295.
— темные волокна 307.
— факелы 285, 301, 302.
— флоккулы 290, 302.
— фотосфера 282, 284.
— хромосфера 285, 304, 306.
— хромосферные вспышки 305, 306.
— циклическая деятельность 295—301, 308, 316—322, 421—423.
— энергии излучение 421, 422.
— эрупции 305.
Солнце 7—10, 32—38, 40, 41, 51, 59, 60, 62, 66—69, 86, 88, 94, 103, 104, 106, 114, 117, 127, 130, 131, 133, 156, 159, 160, 164, 169, 175, 177, 187, 198, 204, 205, 209, 212, 213, 277—324, 328, 335, 340, 347, 350, 351, 410—413, 421, 423, 424, 426, 427, 431.
Солнцестояние зимнее 34, 35.
— летнее 34.
Спектральная классификация 328—333, 345, 346.
Спектральный анализ 204, 205.
Спектрооблометр 196.
Спектрогелиограмма 301, 307.
Спектрогелиограф 289—292, 303.
Спектрогелиоскоп 289—292.
Спектрограмма 209, 291, 292.
Спектрограф 207, 209, 287, 304.
Спектроскоп 207, 307.
Слика 362, 443.
Способ перевозки хронометров 82.
Спутник Сириуса 353—356, 362, 389.
Спутники 234, 244—246.

— звезд 377.
— Марса 244.
— Нептуна 245.
— Сатурна 245, 246.
— Урана 246.
— Юпитера 82, 244, 245.
Среднее солнце 41—43.
Старый стиль 52.
Стереоскопатор 194, 201.
Стояние планеты 98, 99.
Сумерки 63, 64.
Сутки звездные 437.
— средние солнечные 437.
Суточный ход 85.
Сферический треугольник 54—57, 86.
Счислимое место 93.

Т

Тектиты 272.
Телескоп 108, 124, 182—185.
Теллурические линии 210, 211.
Теодолит 72.
Теория ионизации 216, 217.
— звездных атмосфер 347, 349.
— относительности 178, 179, 423.
— свечения газовых туманностей 347.
Термоэлемент 195.
Теория 245, 440.
Титан 246, 440.
Титания 246, 440.
Топография 97.
Точка весеннего равноденствия 27, 34, 40, 49, 50.
— востока 24, 25, 35.
— запада 24.
— зенита 76.
— осеннего равноденствия 34, 67.
— севера 25.
Триангуляция 137—139.
Тритон 246, 440.
Тропик Козерога 36.
— Рака 36.
Туманности внегалактические 390, 413.
— газовые 394—396, 425.
— галактические 389.
— диффузные 388, 390, 421.
— планетарные 390, 391, 407.
— пылевые 425.
— темные диффузные 390, 392—395.

У

Угол понижения горизонта 135, 136.
«Угловые мешки» 409.
«Удивительная Кита» 136, 137.
Умбриэль 246, 440.
Универсальный инструмент 71—77.
Уравнение времени 43, 44.
— синодического движения 106, 127.
Уран 98—100, 171—173, 218—221, 229, 233, 428, 431, 438—440.
Уровенная поверхность 142.
Ускорение силы тяжести 143, 144, 437.
Установка экваториальная 86.
Устойчивость солнечной системы 171.

Ф

Фазы Венеры 222.
— Луны 125—127.
Феба 245, 440.
Фигуры Видманштеттена 272.
Фобос 244, 430, 440.
Фомальгаут 443.
Формула Планка 205, 293.
— Погсона 197.
Фотографическая пластинка 195.
Фотометр фотоэлектрический 200.
Фотометрия визуальная 198, 199.
— фотографическая 199, 200.
Фотоэлемент 195.
Фраунгоферовы линии 305.

Х

Ход часов 78—80.
Хондриты 271.
Хронограф 83.
Хронометр 78, 79, 82, 84.

Ц

Целостат 278—280.
α Центавра 123, 337, 338, 341, 362, 443.
β Центавра 443.
Церера 249, 441.
Цефеиды 379—382, 402, 403, 407.

δ Цефея 379, 380.
μ Цефея 341.
UU Цефея 354, 429.

Ч

Часовой механизм 87, 278.
— пояс 45, 47.
— угол 26, 27.
Часы 78—80.
— кварцевые 79.
Часы-нониус 83.

Ш

Широта галактическая 399, 400.
— гелиографическая 285.
— географическая 29, 62, 68, 69, 77, 116, 285.
— геоцентрическая 116.
— места наблюдения 28—32, 54, 77, 78, 84.
— светила эклиптическая 39.
Шкала звездных величин 197, 198.

Э

Эволюция системы Земля—Луна 236.
Экваториал 86—88.
Эклиптика 33, 41, 50, 125.
Элементы планетных орбит

165, 166.

Эллипсоид Красовского 141.
— трехосный 141.
Эллиптическое движение 166—168.
Элонгация планеты 99, 104.
Эней 441.
Энциклэд 440.
Эпицикл 100.
Эпоха 165.
— каталога 89.
Эра 53, 54.
Эрот 117, 247, 248, 250, 441.
Эфемерида 58, 168, 169.
Эффект Допплера — Физо см. Явление Допплера — Физо
— Зеемана 206, 299, 386.
— Эвершеда 300.
— Эйнштейна 362.

Ю

Юнона 441.
Юпитер 7, 94, 98—100, 104, 105, 108, 109, 218—221, 229—231, 428, 429, 431, 438—440.

Я

Япет 245, 440.
Ясли 406.

СОДЕРЖАНИЕ

Из предисловий к предыдущим изданиям 3

Предисловие к четвертому изданию —

Глава I. Введение

- § 1. Предмет астрономии и ее значение 5
- § 2. Краткий очерк истории астрономии 6
- § 3. Подразделение современной астрономии 16

Глава II. Основы сферической астрономии

- § 4. Звездное небо и его видимое суточное вращение 18
- § 5. Небесная сфера 22
- § 6. Сферические координаты. Горизонтальная система небесных координат 24
- § 7. Экваториальные системы небесных координат 25
- § 8. Связь между высотой полюса мира и широтой места наблюдения. Высота светила в меридиане 28
- § 9. Видимое годичное движение Солнца и изменение его экваториальных координат 32
- § 10. Эклиптическая система координат 38
- § 11. Измерение времени. Звездное время 39
- § 12. Солнечное время 41
- § 13. Всемирное, поясное и декретное время. Время и долгота 44
- § 14. Линия изменения даты 48
- § 15. Календарь 49
- § 16. Эра и счет годов 53
- § 17. Лунные и лунно-солнечные календари 54
- § 18. Сферический треугольник —
- § 19. Параллактический треугольник. Преобразование координат 57
- § 20. Вычисление моментов и мест восхода и захода светил 59
- § 21. Рефракция 60
- § 22. Мерцание звезд. Сумерки 63

Глава III. Основы практической астрономии

- § 23. Задачи практической астрономии 65
- § 24. Ориентировка по Солнцу, Луне и звездам 66
- § 25. Приближенные способы определения меридиана, географической широты и поправки часов 68
- § 26. Солнечные часы. Солнечное кольцо 69
- § 27. Универсальный инструмент 71
- § 28. Измерение горизонтальных координат универсальным инструментом 75
- § 29. Определение широты места на Земле 77
- § 30. Часы. Поправка и ход часов 78
- § 31. Пассажный инструмент 80
- § 32. Определение долготы места наблюдения 81
- § 33. Служба времени 82
- § 34. Определение склонений и прямых восхождений звезд. Меридианный круг 84
- § 35. Экваториал 86
- § 36. Точные положения звезд. Звездные каталоги 88
- § 37. Применение астрономии в мореплавании и в самолетовождении 90
- § 38. Секстант 94
- § 39. Применение астрономии в геодезии и картографии 96

Глава IV. Строение солнечной системы и движения планет

- § 40. Видимые движения планет 98
- § 41. Система мира Птолемея 100
- § 42. Гелиоцентрическая система Коперника и произведенный ею переворот в мировоззрении 101
- § 43. Объяснение видимых движений планет 103
- § 44. Определение периодов обращений и относительных расстояний планет от Солнца 104
- § 45. Борьба за гелиоцентрическое мировоззрение 106

§ 46. Первые телескопические открытия Галилея	108
§ 47. Кеплер и его законы планетных движений	109
§ 48. Определение расстояний в солнечной системе. Суточный параллакс	112
§ 49. Определение расстояний до Луны и Солнца	114
§ 50. Определение размеров Солнца, Луны и планет	118
§ 51. Доказательства вращения Земли вокруг оси	119
§ 52. Годичный параллакс звезд	122
§ 53. Аберрация света	124
§ 54. Видимое движение Луны относительно звезд и ее фазы	125
§ 55. Солнечные и лунные затмения	127

Глава V. Земля

§ 56. Шарообразность Земли	134
§ 57. Дальность видимого горизонта	135
§ 58. Угол понижения горизонта	—
§ 59. Первые измерения размеров Земли	136
§ 60. Триангуляция	137
§ 61. Результаты градусных измерений. Элементы земного сфероида	139
§ 62. Истинная фигура Земли	141
§ 63. Изменения силы тяжести на поверхности Земли в зависимости от широты	143
§ 64. Гравиметрические приборы	145
§ 65. Аномалии силы тяжести. Изостазия	147
§ 66. Геодезические и гравиметрические работы в СССР	148
§ 67. Измерение массы и средней плотности Земли	149
§ 68. Внутреннее строение Земли	151

Глава VI. Закон всемирного тяготения и основы небесной механики

§ 69. Открытие Ньютоном закона всемирного тяготения	154
§ 70. Вывод закона всемирного тяготения из законов Кеплера	156
§ 71. Окончательная формула закона всемирного тяготения	158
§ 72. Вывод первого и второго законов Кеплера из закона всемирного тяготения	159
§ 73. Вывод третьего закона Кеплера из закона всемирного тяготения	163
§ 74. Определение масс Солнца, Луны и планет	164
§ 75. Элементы планетных орбит	165
§ 76. Эллиптическое движение	166
§ 77. Понятие о вычислении орбит и эфемерид	168
§ 78. Понятие о задаче трех тел	169
§ 79. Возмущения планетных орбит и вопрос об устойчивости солнечной системы	117

§ 80. Открытия Нептуна и Плутона	—
§ 81. Прецессия и нутация	174
§ 82. Приливы и отливы	175
§ 83. Движение Луны и лунные возмущения	178
§ 84. Движение перигелия Меркурия и теория относительности	—

Глава VII. Методы астрофизики

§ 85. Основные методы астрофизики	180
§ 86. Общие свойства телескопов	182
§ 87. Рефракторы и астрографы	185
§ 88. Рефлекторы и их сравнение с рефракторами	187
§ 89. Астрофотография и ее применение	189
§ 90. История развития телескопа	190
§ 91. Измерения и исследования астрофотографий	193
§ 92. Основы астрофотометрии	195
§ 93. Шкала звездных величин	197
§ 94. Визуальная фотометрия	198
§ 95. Фотографическая фотометрия	199
§ 96. Фотоэлектрические фотометры	200
§ 97. Астрономические обсерватории	—
§ 98. Основы спектрального анализа	204
§ 99. Законы излучения. Принцип Допплера—Физо	205
§ 100. Спектральные приборы	207
§ 101. Определение цвета и показателей цвета небесных светил	209
§ 102. Теллурические линии и их исследование	210
§ 103. Определение качественного химического состава атмосфер и лучевых скоростей светил	211
§ 104. Радиометоды в астрономии	213
§ 105. Давление света	216
§ 106. Теория ионизации	—

Глава VIII. Планеты и их спутники

Большие планеты

§ 107. Общий обзор строения планетной системы. Две группы больших планет	218
§ 108. Меркурий	221
§ 109. Венера	222
§ 110. Марс	224
§ 111. Атмосфера и климат на Марсе	227
§ 112. Каналы Марса	228
§ 113. Планеты-гиганты солнечной системы. Юпитер	229
§ 114. Сатурн	231
§ 115. Уран, Нептун и Плутон	233

Спутники планет. Луна

§ 116. Размеры, масса и плотность Луны. Вращение вокруг оси	234
§ 117. Либрация Луны	235
§ 118. Эволюция системы «Земля—Луна»	236

§ 119.	Отсутствие атмосферы и воды на Луне. Температура лунной поверхности	—
§ 120.	Устройство поверхности Луны и объяснение особенностей ее рельефа	237
§ 121.	Физические условия на Луне	244
§ 122.	Спутники Марса	—
§ 123.	Спутники Юпитера	—
§ 124.	Спутники Сатурна	245
§ 125.	Спутники Урана и Нептуна	246

Малые планеты, или астероиды

§ 126.	История открытия малых планет	246
§ 127.	Орбиты малых планет. Особенности их движения	247
§ 128.	Физическое строение малых планет	249
§ 129.	Зодиакальный свет и противостояние	251

Глава IX. Кометы, метеоры и метеориты

§ 130.	Краткий очерк прежних воззрений на природу комет	252
§ 131.	Открытие комет и их орбиты	254
§ 132.	Строение комет	255
§ 133.	Некоторые замечательные кометы	256
§ 134.	Механическая теория кометных форм	258
§ 135.	Физическая природа комет, происхождение и распад их	262
§ 136.	Метеоры, болиды и метеориты	265
§ 137.	Химический состав метеоритов и их орбиты	271
§ 138.	Метеорные потоки и их радианты. Потоки, связанные с кометами	272

Глава X. Солнце

§ 139.	Значение изучения Солнца	277
§ 140.	Особенности методов исследования Солнца	278
§ 141.	Расстояние, размеры и масса Солнца	281
§ 142.	Общий вид Солнца. Вращение его	282
§ 143.	Спектр Солнца и состав солнечной атмосферы	286
§ 144.	Спектрогелиограф и спектрогелиоскоп	289
§ 145.	Температура Солнца	292
§ 146.	Солнечные пятна. Цикличность появлений и природа их	295
§ 147.	Факелы	301
§ 148.	Хромосфера	303
§ 149.	Протуберанцы	306
§ 150.	Солнечная корона	310
§ 151.	Связь геофизических явлений с циклической деятельностью Солнца	316
§ 152.	Использование солнечной энергии	322

Глава XI. Общий обзор и физическое строение звезд

§ 153.	Введение	325
§ 154.	Число звезд	326
§ 155.	Спектры звезд. Классификация звездных спектров	328
§ 156.	Собственные движения звезд	333
§ 157.	Лучевые скорости звезд	325
§ 158.	Движение солнечной системы	—
§ 159.	Тригонометрические параллаксы звезд	336
§ 160.	Абсолютные величины и светимости звезд	338
§ 161.	Спектральные параллаксы звезд	340
§ 162.	Цвета и показатели цвета звезд	341
§ 163.	Причины возникновения темных и ярких линий в звездных спектрах	342
§ 164.	Физическая интерпретация звездной классификации	345
§ 165.	Понятие температуры звезды	346
§ 166.	Методы определения температур звезд	347
§ 167.	Определение температур звезд	—
§ 168.	Болометрическая звездная величина	349
§ 169.	Результаты измерений звездных температур	—
§ 170.	Количественный химический анализ атмосфер звезд и Солнца	350
§ 171.	Методы определения диаметров звезд	351
§ 172.	Вычисление диаметров звезд с известной температурой	352
§ 173.	Определение диаметров звезд при помощи интерферометра	—
§ 174.	Результаты измерений диаметров звезд	353
§ 175.	Белые карлики	354
§ 176.	Массы и плотности звезд	356
§ 177.	Диаграмма «спектр—светимость»	357
§ 178.	Типичные звезды (общий обзор)	361
§ 179.	Вращение звезд	363

Глава XII. Двойные, переменные и новые звезды.

Диффузная материя

§ 180.	Открытия и классификация двойных звезд	364
§ 181.	Физические и оптические визуально-двойные звезды	365
§ 182.	Видимые и истинные орбиты	366
§ 183.	Определение масс визуально-двойных звезд	368
§ 184.	Спектрально-двойные звезды	370
§ 185.	Определение орбит и масс спектрально-двойных звезд	372
§ 186.	Затменно-двойные звезды	373
§ 187.	Определение орбит и физических характеристик затменно-двойных звезд	375
§ 188.	Общие закономерности в двойных системах	376
§ 189.	Невидимые спутники звезд	377

§ 190. Открытия и классификация переменных звезд	—
§ 191. Цефеиды	379
§ 192. Долгопериодические переменные звезды	382
§ 193. Неправильные и полуправильные переменные звезды	383
§ 194. Новые звезды. Данные наблюдений	—
§ 195. Сверхновые звезды	386
§ 196. Объяснение явлений, наблюдающихся в новых и сверхновых звездах	—
§ 197. Диффузная материя	389
§ 198. Планетарные туманности	390
§ 199. Светлые диффузные туманности	391
§ 200. Темные диффузные туманности	392
§ 201. Физика газовых туманностей	394
§ 202. Межзвездная среда	396

Глава XIII. Наша галактическая система и другие галактики

§ 203. Млечный Путь	398
§ 204. Галактические координаты	399
§ 205. Галактическая концентрация	400
§ 206. Звездные скопления и их классификация	401
§ 207. Шаровые звездные скопления	402
§ 208. Рассеянные звездные скопления и звездные ассоциации	404
§ 209. Наша звездная система—Галактика	406
§ 210. Вращение Галактики	409
§ 211. Галактики	413

§ 212. Смещение линий в спектрах галактик и критика идеалистической трактовки этого явления	417
---	-----

Глава XIV. Космогония

§ 213. Возраст Земли, Солнца и звезд	420
§ 214. Излучение энергии звездами и Солнцем	421
§ 215. Гипотезы об источниках энергии Солнца и звезд	422
§ 216. Внутреннее строение звезд	424
§ 217. Возникновение и развитие звезд и диффузной материи	—
§ 218. Закономерности в солнечной системе	427
§ 219. Первые космогонические гипотезы	428
§ 220. Гипотеза Лапласа	—
§ 221. Возражения против гипотезы Лапласа	429
§ 222. Критика катастрофических гипотез о возникновении солнечной системы	431
§ 223. Современные гипотезы образования солнечной системы	433
§ 224. Вселенная как материальный процесс, развертывающийся во времени и в пространстве	435
Приложения	
Таблицы	437
Рекомендуемая литература по астрономии	446
Указатель имен	452
Указатель предметов	454
Карты звездного неба (на вклейках)	—

*Павел Иванович Попов,
Константин Львович Баев,
Борис Александрович Воронцов-Вельяминов,
Ростислав Владимирович Куницкий*

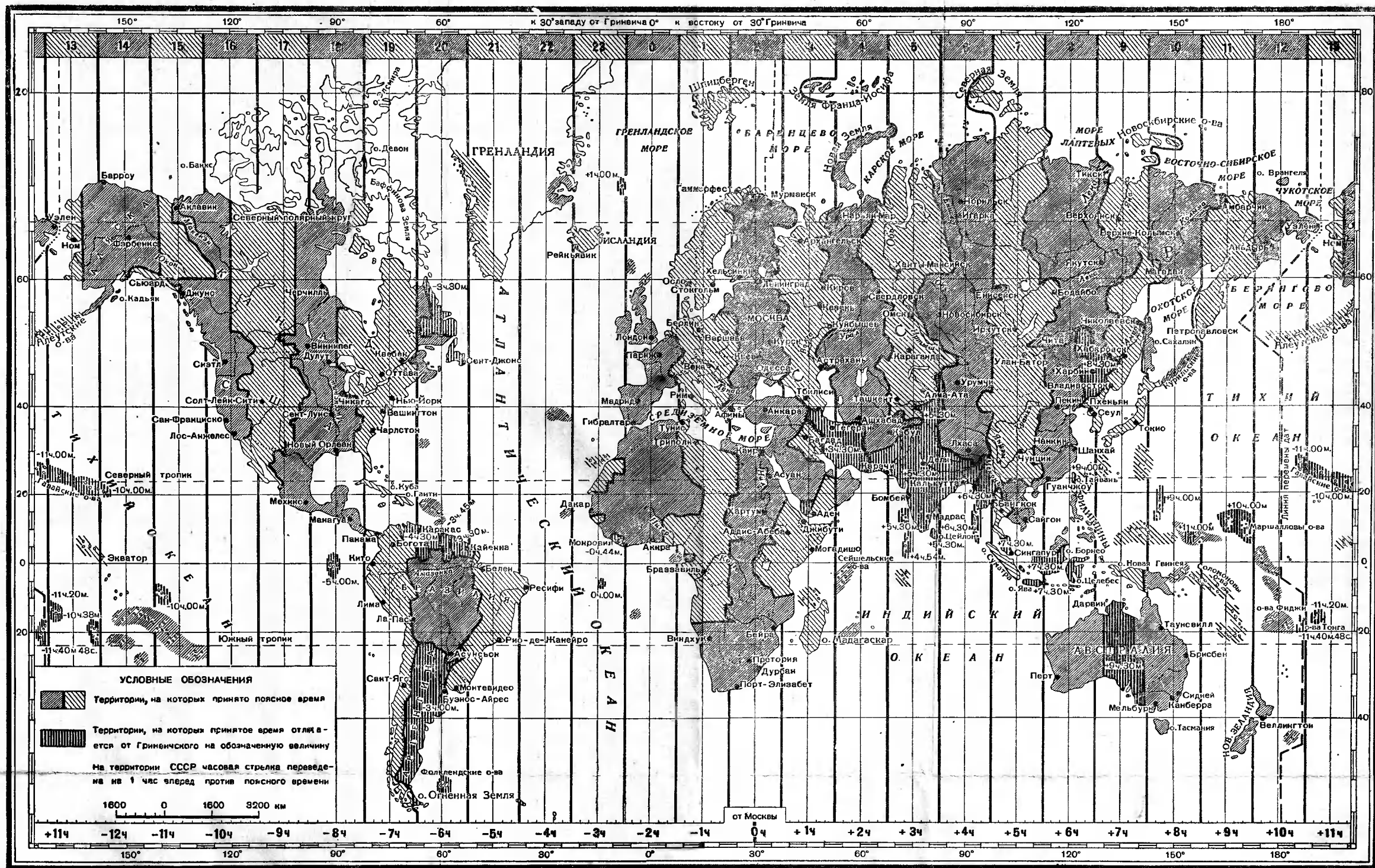
АСТРОНОМИЯ

Редактор С. А. Шорыгин
Редактор карт К. Ф. Зайцева
Художественный редактор Б. М. Кисин
Техн. редактор Н. П. Цирульников
Корректор Н. И. Котельникова

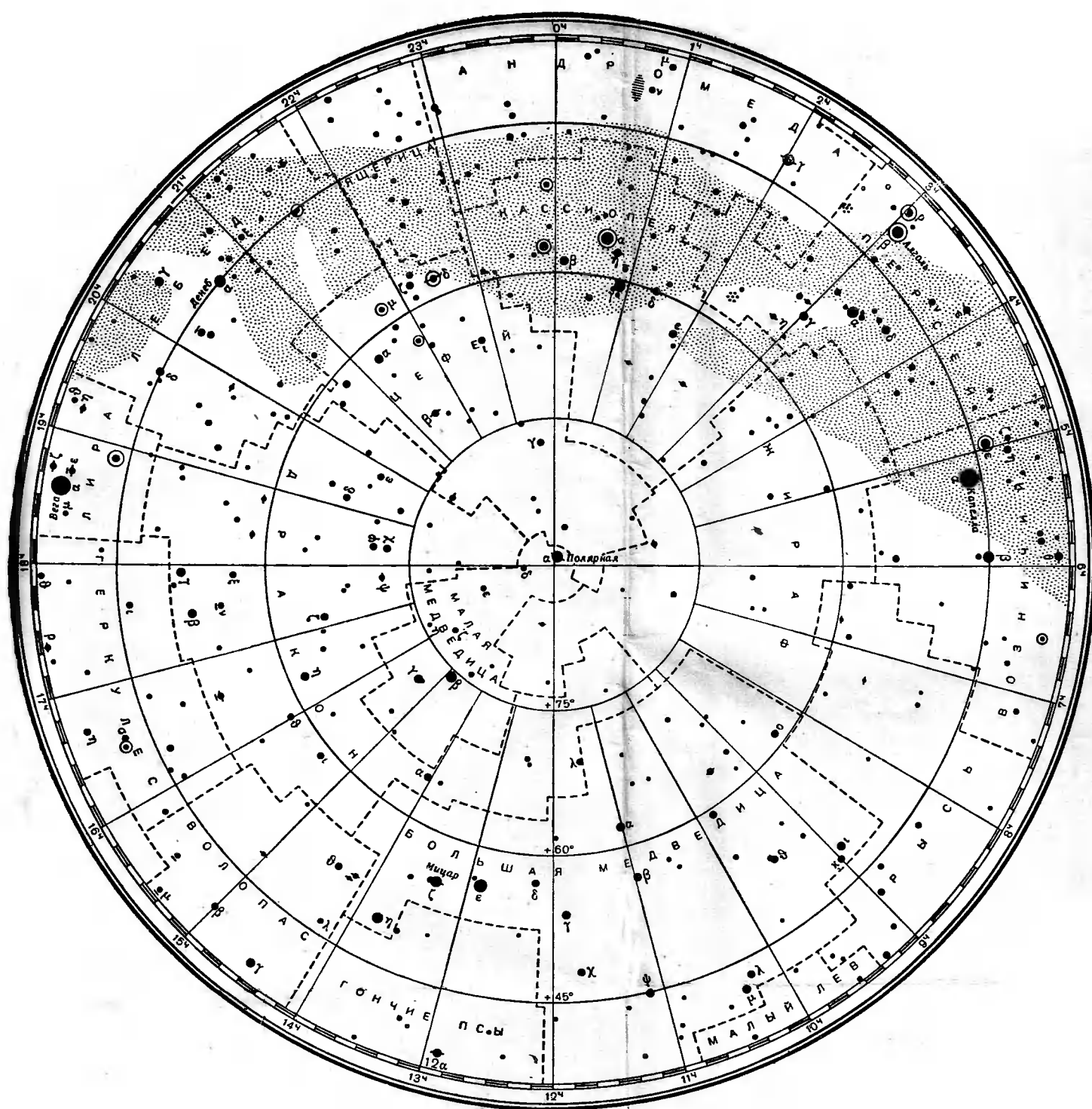
Слано в набор 3/VII 1958 г. Подписано к печати
25/XI 1958 г. 60×92¹/₁₆ 29 + 1,7 (1,55) вкл. п. л.
Уч.-изд. л. 30,61 + 1,09 вкл. Тираж 16000 экз. А 10065.
Цена без переплета 9 р. 85 к.
Переплет лидеринный 2 р.

Учпедгиз. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41
Заказ 1327

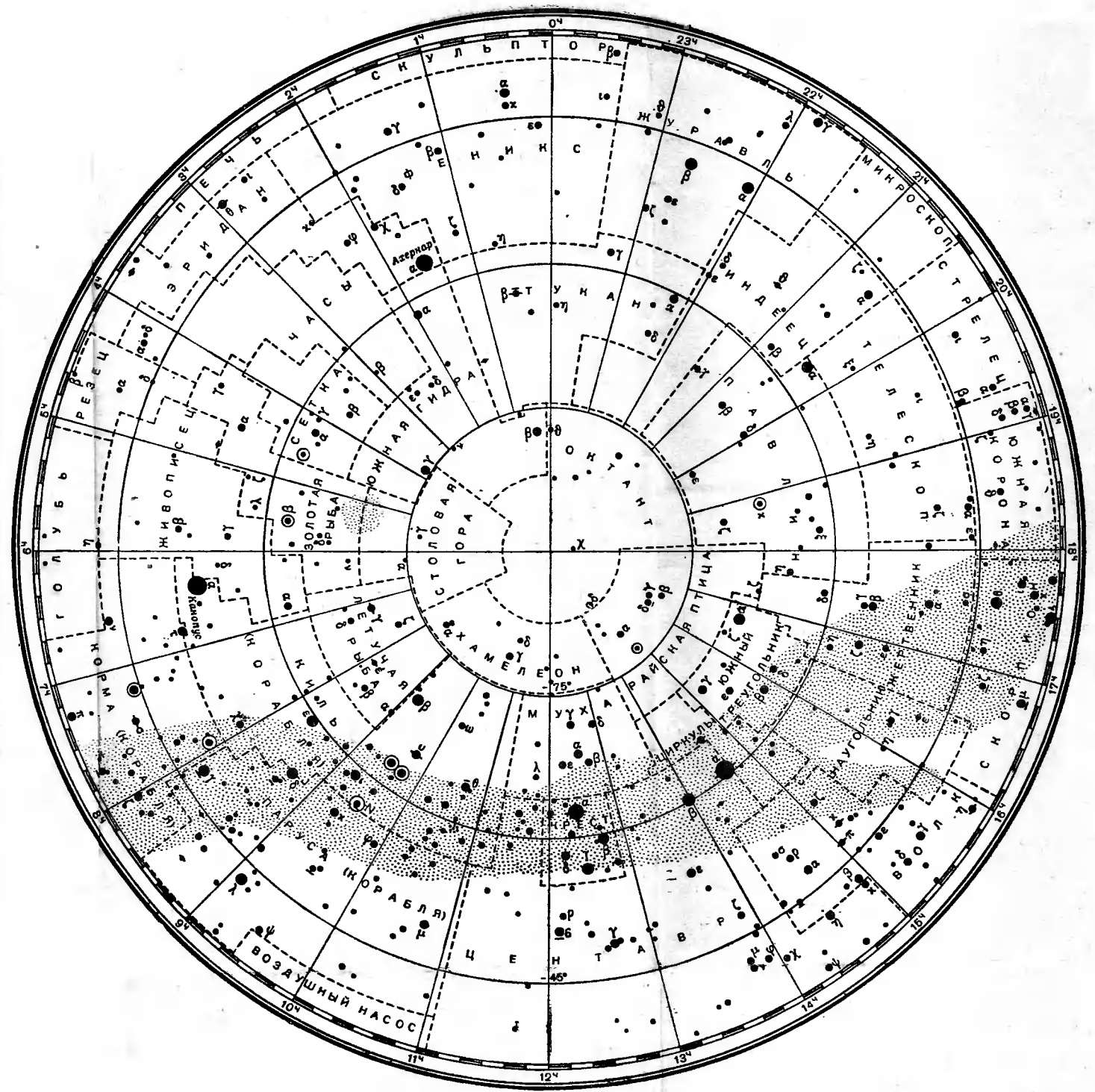
Типография № 4 УПП Ленсовнархоза,
г. Ленинград, Социалистическая, 14



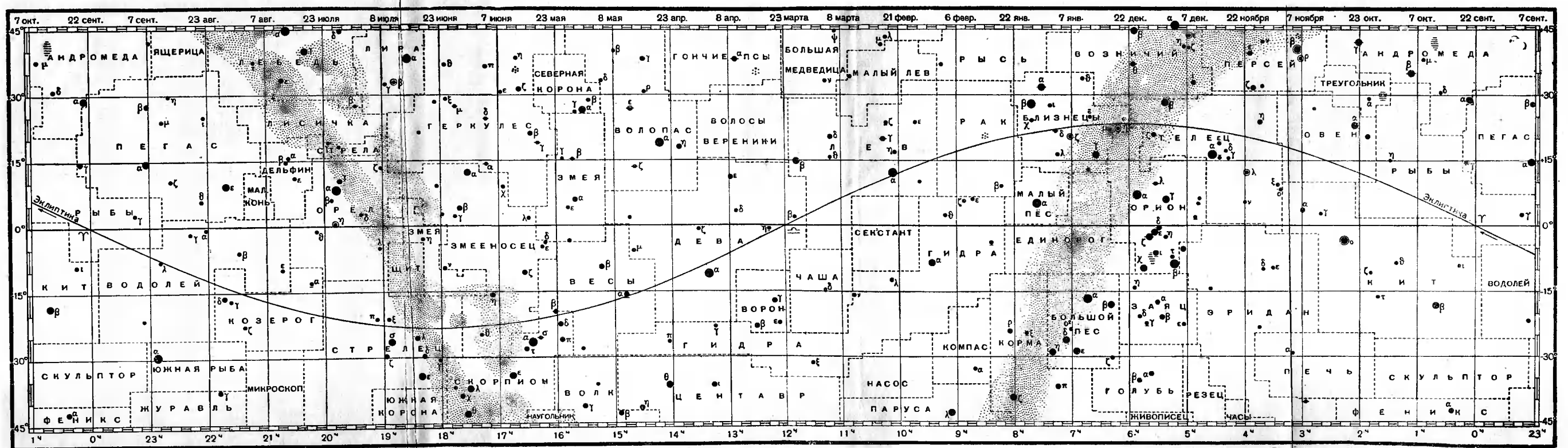
Мировая карта часовых поясов



Северное небо от полюса до $+40^\circ$ склонения



Южное небо от полюса до -40° склонения



Экваториальный пояс от $+45^\circ$ до -45° склонения

