

В.А.БРОНШТЭН



**ГИПОТЕЗЫ
О ЗВЕЗДАХ
И
ВСЕЛЕННОЙ**



НЕСКОЛЬКО СЛОВ ДЛЯ НАЧАЛА

Несколько лет назад автор выпустил книгу «Беседы о космосе и гипотезах» («Наука», 1968), в которой попытался рассказать читателям, как создаются, проверяются и опровергаются научные гипотезы о происхождении и природе небесных тел. Небольшой объем книги заставил ограничиться пределами Солнечной системы, хотя даже и в этих пределах были рассмотрены далеко не все проблемы, служившие пробным камнем для гипотез, в том числе довольно известных. Но в нашу задачу и не входило давать сводку всех гипотез о происхождении тел Солнечной системы — изложение гипотез служило лишь примером творчества ученых-теоретиков, и л л ю с т р а ц и е й научного поиска.

Такую же цель мы ставим перед собой и в этой книге, которая продолжает линию повествования предыдущей. Но теперь мы выходим на просторы Большой Вселенной. Здесь мы сразу сталкиваемся с величайшим разнообразием небесных тел: звезды, одиночные, двойные и кратные, спокойные и нестационарные, красные гиганты и белые карлики, новые и сверхновые; туманности, газовые и пылевые, диффузные и планетарные; звездные скопления, рассеянные и шаровые; галактики, спиральные и эллиптические, гигантские и карликовые, компактные и неправильные; скопления галактик; наконец, Метагалактика и Большая Вселенная. А недавно открытые квазары, пульсары, нейтронные звезды и загадочные «черные дыры»? Даже дух захватывает от разнообразия объектов. С чего начать? На что обратить внимание?

Как и в первой книге, мы решили, не нарушая общей связности изложения, отобрать те проблемы, которые являются наиболее удобными и благодарными для иллюстрации «творческой кухни» астрономов и в то же время представляют интерес для читателя. Некоторые из этих проблем давно уже решены, но мы возвратимся к тем временам, когда ученые к ним еще только приступали. Другие лишь недавно поставила перед учеными бесконечно разно-

образная природа, и они еще не нашли решения. Незбежным спутником всякого научного поиска является гипотеза, т. е. научное предположение, с помощью которого исследователь стремится объяснить наблюдаемые явления.

Увы, многие любители науки совершенно неправильно понимают как смысл понятия «гипотеза», так и путь ее создания. Им почему-то представляется, что придумывание гипотез — довольно легкое дело и им может заниматься каждый желающий. Не имея специальных знаний и подготовки, эти люди буквально забрасывают научные учреждения нашей страны своими творениями — толстыми, многословными, но совершенно безграмотными сочинениями, не выдерживающими серьезной научной критики. Таких людей называют гипотезоманами. Часто это просто психически больные люди, страдающие навязчивым «бредом изобретений и открытий».

В «Беседах о космосе и гипотезах» мы посвятили гипотезоманам целую главу. На этот раз мы не будем столь расточительны и ограничимся этими краткими замечаниями. Все равно, как бы ни изощрялись гипотезоманы, их усилия «протиснуться» в большую науку тщетны. И именно с ней, с Наукой с большой буквы хотим мы познакомить нашего читателя.

Науку часто сравнивают с храмом, куда не позволено входить непосвященным. Это сравнение верно только отчасти. Да, непосвященным разобратся в науке трудно. Но это не потому, что наука — храм, где на золотых полках разложены скрижали незыблемых законов, которым нужно только поклоняться и благоговеть перед ними. Нет, наука — это скорее бурное море, где на каждом шагу ученого подстерегают новые трудности, загадки, проблемы, где приходится все время лавировать, чтобы их преодолеть, разрешить, разгадать. Неопытный захлебнется в них, умелый всегда найдет верный путь. Может быть, не сразу, а через годы труда, поисков, ошибок. Но найдет непременно. Найдет потому, что он вооружен знаниями. Всей той суммой знаний, которую накопили его предшественники и которую чуть-чуть приумножил он сам.

А теперь нам пора, читатель, самим пуститься в плавание. Нас ожидает мир звезд, а за ним — Большая Вселенная. Первый порт на пути — ближайшая звезда, т. е. наше Солнце. С него мы и начнем.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|------------|
| Несколько слов для начала | 5 |
| Г л а в а I. Солнце и звезды | 7 |
| За счет чего светит Солнце? | 7 |
| Великий закон | 8 |
| Метеорная гипотеза | 10 |
| Контракционная гипотеза | 11 |
| Радиоактивность в звездах? | 15 |
| Аннигиляция? Синтез элементов? | 19 |
| О чем говорят спектры | 22 |
| Что такое главная последовательность | 26 |
| Звездные модели | 28 |
| Жизненный путь звезды | 36 |
| Длинная или короткая шкала? | 46 |
| Источник найден! | 52 |
| Эволюция вдоль или эволюция поперек? | 61 |
| Открытия в звездной астрономии | 72 |
| Картина звездной эволюции проясняется | 78 |
| Конец пути | 85 |
| Нейтронные звезды и «черные дыры» | 90 |
| Г л а в а II. Необычные звезды | 95 |
| Пульсирующие звезды | 95 |
| От гипотезы к теории | 105 |
| Рождение или смерть? | 117 |
| Новые звезды преподносят сюрпризы | 129 |
| Сверхновые звезды | 138 |
| Крабовидная туманность радирует | 143 |
| Космические лучи | 155 |
| Почему же они взрываются? | 163 |
| Г л а в а III. Гипотезы о рождении звезд | 173 |
| Как рождаются звезды? | 173 |
| Звезды из туманностей или туманности из звезд? | 176 |
| Звездные цепочки и глобулы | 179 |
| Открытие, сделанное в Бюракане | 184 |
| Спор о звездных ассоциациях | 190 |
| Исходный материал — газ? | 199 |
| Газ и магнитное поле | 209 |
| Существуют ли Д-тела? | 219 |
| Г л а в а IV. Гипотезы об эволюции галактик | 224 |
| Звездные острова или туманности? | 224 |
| «Великий спор» | 227 |

| | |
|---|------------|
| Классификация Хаббла | 233 |
| Гравитация, неустойчивость, сжатие | 236 |
| Галактики молодые и старые | 243 |
| Как образуются спирали? | 253 |
| Магнитное поле и спиральные рукава | 257 |
| Спиральные рукава — волновые образования | 264 |
| Г л а в а V. На просторах Метагалактики | 268 |
| Красное смещение | 268 |
| Расширяющаяся Вселенная | 272 |
| «Сотворение мира» | 280 |
| Гипотеза «старения» фотонов | 289 |
| Теория «стационарной» Вселенной | 291 |
| А все-таки она расширяется! | 296 |
| Г л а в а VI. Аномальные галактики и квазары | 301 |
| Галактики испускают радиоволны | 301 |
| Столкновение или взрыв? | 304 |
| Взаимодействующие галактики | 311 |
| Галактики Сейферта, Маркаряна и другие | 317 |
| Взрыв в галактике М 82 | 325 |
| Что таится в ядрах галактик? | 330 |
| Открытие «радиозвезд» | 333 |
| Снова красное смещение | 336 |
| Радиогалактики или сверхзвезды? | 338 |
| Эффект Доплера или эффект Эйнштейна? | 340 |
| Теоретики идут на штурм | 343 |
| Начало правильной осады | 353 |
| Квазары и аномальные галактики | 356 |
| Г л а в а VII. Горячая Вселенная | 363 |
| Ищем начало пути | 363 |
| Горячая Вселенная | 364 |
| Следы далекого прошлого | 368 |
| Первые десять минут | 373 |
| Что было до взрыва? | 378 |
| В сжимающейся Вселенной | 380 |
| От атомов до млечных путей | 382 |

Г л а в а I

СОЛНЦЕ И ЗВЕЗДЫ

За счет чего светит Солнце?

Жаркий солнечный день. Каждый человек ощущает в это время тепло солнечных лучей, все понимают, что именно Солнце — источник тепла на Земле, источник света. Даже школьникам известно то, что энергия воды, вращающая турбины гидроэлектростанций, энергия ветра — это превращенная в другие виды энергия солнечных лучей. А сколько энергии запасают растения благодаря реакции фотосинтеза? Используемая нами энергия каменного угля, торфа — это тоже солнечная энергия, запасенная когда-то жившими растениями.

Сколько энергии посылает Солнце на Землю? Эта величина давно известна, давно измерена. Один квадратный сантиметр поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, за минуту получает 1,94 калории. Эта величина получила название солнечной постоянной. Если перевести ее в энергетические единицы, получим $1,35 \cdot 10^6$ эрг/сек, или 0,135 вт. На весь земной шар поступает поток энергии в $1,7 \cdot 10^{14}$ квт. Лишь ничтожная доля этой энергии (тысячные доли процента) используется человеком.

На Землю попадает лишь примерно одна двухмиллиардная доля всего солнечного излучения. Именно такую часть сферы занимает Земля на «небе» Солнца. Примерно такие же «крохи» и даже значительно меньшие достаются другим планетам. Но большая часть солнечной энергии пока бесполезно рассеивается в межзвездном пространстве *).

Нетрудно подсчитать общее количество энергии, излучаемой Солнцем. Поверхность сферы, радиус которой равен радиусу земной орбиты, составит

$$4\pi R^2 = 4\pi (1,5 \cdot 10^{13})^2 = 2,8 \cdot 10^{27} \text{ см}^2.$$

*) Мы говорим «пока», так как существуют проекты использования почти всей солнечной энергии человечеством («сфера Дайсона»).

Помножив это число на солнечную постоянную, получим
 $0,135 \cdot 2,8 \cdot 10^{27} = 3,8 \cdot 10^{26} \text{ вт} = 3,8 \cdot 10^{23} \text{ квт.}$

Это и есть полная мощность излучения Солнца. Даже один квадратный сантиметр солнечной поверхности испускает энергию мощностью свыше 6 киловатт. Солнце — это настоящая фабрика энергии.

Но энергия Солнца не может возникать из ничего — у нее должен быть какой-то источник. Что служит источником солнечной энергии? За счет чего светит Солнце?

Этот вопрос встал перед астрономами и физиками примерно в середине XIX в. И не случайно. Ведь как раз в сороковых годах XIX в. Роберт Майер, Джеймс Джоуль и Герман Гельмгольц независимо друг от друга сформулировали закон сохранения и превращения энергии, согласно которому энергия не может возникать из ничего и не может уничтожаться, а способна только превращаться, переходить из одного вида в другой.

История открытия закона сохранения энергии — одна из увлекательных страниц истории физики. Нам по необходимости придется затронуть ее лишь вкратце.

Великий закон

Еще в 1748 г. М. В. Ломоносов в письме к Л. Эйлеру изложил свои мысли о «всеобщем естественном законе» сохранения материи и движения, охватывающем «все перемены, в Натуре случающиеся». Этим он предвосхитил, в сущности, все законы сохранения, которые были открыты много позже. Но у Ломоносова еще не было экспериментальных данных, которые позволили бы количественно обосновать его закон. Такие данные появились лишь спустя столетие.

В 1842 г. немецкий врач и естествоиспытатель Роберт Майер опубликовал в химико-фармацевтическом журнале (!) статью «Замечания о силах неживой природы», в которой тщательно обосновал, опираясь на количественные подсчеты, идею сохранения энергии.

В статье «Замечания о силах неживой природы» Майер использует приближенное значение механического эквивалента теплоты, полученное им из сравнения теплоемкостей газов при постоянном давлении и постоянном объеме. Но в том же 1842 г. Дж. Джоуль в Манчестере и датский физик Людвиг Кольдинг в Копенгагене в ходе тщательных

экспериментов определили величину механического эквивалента теплоты с достаточной точностью. В следующей своей работе «Органическое движение в связи с обменом веществ», опубликованной в 1845 г., Майер, исходя из принципа «из ничего не рождается ничто», старается охватить единым законом все известные в то время превращения энергии. Тут же он пишет: «Солнце... является неисчерпаемым источником физической силы. Поток этой силы, проливающийся и на нашу Землю, есть та непрестанно заводящаяся пружина, которая поддерживает в состоянии движения механизм всех происходящих на Земле деятельностей».

Надо сказать, что термина «энергия» в то время не существовало — он был предложен Рэнкиным значительно позже. Вместо «энергии» употреблялся термин «сила», что нередко приводило к неясностям и недоразумениям.

Год спустя после выхода второй работы Майера, в 1846 г., английский физик Уильям Гров, адвокат по образованию, обработав все известные к тому времени результаты по различным видам энергии (механическое движение, теплота, свет, электричество, химическая связь), доказал, что они при определенных условиях переходят друг в друга без потерь. Книга Грова «Соотношение физических сил» не раз переиздавалась, в частности, в 1864 г. в России (в переводе И. И. Мечникова).

Что касается Германа Гельмгольца, то он опубликовал свои исследования лишь в 1847 г. в небольшой книжке под названием «О сохранении силы». Ничего не зная о Майере и Кольдинге и ознакомившись с опытами Джоуля лишь к концу работы, он, по его словам, вступил на тот же путь: старался выяснить количественные связи между различными явлениями природы. Если Майер исходил из принципа «из ничего ничто не возникает», то Гельмгольц положил в основу своей работы принцип причинности: каждое движение, каждый вид энергии должен иметь какую-то причину, «всякое изменение в природе должно иметь достаточное основание». В то же время Гельмгольц, как и Гров, пытался свести все формы изменения материи к механическому движению. Это давало ему возможность получить закон сохранения энергии как интеграл уравнений механики («интеграл живых сил»), а затем обобщить его на явления, описываемые термодинамикой, электрохимией, электродинамикой, теорией колебаний и волн.

Так разными путями пришли эти ученые к открытию одного из важнейших законов природы — закона сохра-

нения энергии. Интересно, что все они были тогда еще очень молодыми людьми. Джоулю в 1842 г. было лишь 24 года, Кольдингу — 27 лет, Майеру — 28, Гельмгольц написал свою книгу в возрасте 26 лет, и лишь Грову было за тридцать.

История науки, порою беспощадная, предала имена Кольдинга и Грова забвению: их теперь не найти ни в одном учебнике. Честь открытия знаменитого закона приписывается теперь только Майеру, Гельмгольцу и Джоулю *).

Но вот наконец великий закон был установлен. Откуда же берется энергия Солнца? Майер и Гельмгольц, каждый по-своему, попытались решить эту трудную проблему.

Метеорная гипотеза

В своем сочинении «Динамика неба», изданном в 1848 г., Майер изложил первую из длинного ряда гипотез об источниках солнечной энергии.

Известно, что на Землю падает большое число **м е т е о р н ы х т е л**, приходящих из межпланетного пространства. Пронизывая с космическими скоростями земную атмосферу, они испаряются, а более крупные, ударяясь о земную поверхность, превращают кинетическую энергию своего движения в тепло. Маленькое метеорное тело, массой всего в один грамм, влетая со скоростью 40 км/сек (эта скорость — средняя для метеоров), передает Земле энергию в $8 \cdot 10^{12}$ эргов, или 800 килоджоулей! Но Солнце обладает гораздо более мощным полем тяготения, метеорные тела должны падать на него со скоростями в 600 км/сек (это вторая космическая скорость для поверхности Солнца) и в большем количестве, чем на Землю. Такое же тело в 1 грамм передаст Солнцу уже $1,8 \cdot 10^{15}$ эргов, или $1,8 \cdot 10^5$ килоджоулей, или 50 киловатт-часов.

Вспомним, что расход солнечной энергии составляет $3,8 \cdot 10^{23}$ киловатт (т. е. килоджоулей в секунду). Если бы энергия Солнца поддерживалась метеорами, то это означало

*) Совсем иначе оценивал роль этих ученых Энгельс. Основная заслуга в открытии механического эквивалента теплоты, по его мнению, принадлежит Майеру, Джоулю и Кольдингу, в обобщении закона — Майеру и Грову. Что касается Гельмгольца, то его роль Энгельс считает гораздо более скромной (Ф. Э н г е л ь с, Диалектика природы, Госполитиздат, 1952, стр. 9, 52, 69, 154, 155, 178, 195, 197).

бы, что каждую секунду на Солнце должно падать метеорного вещества

$$\frac{3,8 \cdot 10^{23}}{1,8 \cdot 10^5} = 2 \cdot 10^{18} \text{ г} = 2 \cdot 10^{12} \text{ т},$$

а в год — $6 \cdot 10^{19}$ тонн, т. е. 0,01 массы Земли. Только тогда сообщаемая метеорами энергия уравновесит лучеиспускание Солнца.

Но допустить падение такой громадной массы на Солнце невозможно по двум причинам. Во-первых, за 5—6 миллиардов лет (возраст Солнца и Земли) на наше центральное светило должно было выпасть... $3 \cdot 10^{29}$ тонн вещества, что в 150 раз превышает массу самого Солнца. Во-вторых, в этом случае на Землю должно выпадать метеорной материи лишь в 2 миллиарда раз меньше, чем на Солнце, т. е. $3 \cdot 10^{10}$ тонн в год. На самом деле на нашу планету падает в миллион раз меньше метеорных тел. Наконец, даже если бы разогрев Солнца действительно происходил за счет падения на него метеоров, получилось бы, что Солнце разогревается с н а р у ж и, тогда как все астрофизические наблюдения (в частности, потемнение Солнца к краю) указывают на то, что энергия Солнца поступает из его недр.

Представим себе газовый шар с размерами и массой Солнца, но без источников энергии внутри. Под действием давления вышележащих слоев внутренние слои этого шара разогреются до довольно высоких температур, и установится некоторый градиент температуры, направленный наружу. Если теперь «включить» источник нагревания, действующий снаружи, то некоторый поверхностный слой, имевший вначале более низкую температуру, чем нагреваемая метеорами поверхность, быстро прогреется до такой же температуры и станет изотермическим. Но наблюдения показывали, что даже в самых наружных слоях Солнца температура растет в глубину. Факты явно противоречили метеорной гипотезе.

Контракционная гипотеза

Гипотеза, предложенная в 1854 г. Гельмгольцем, была свободна от этого противоречия. Зная, что при сжатии тела разогреваются, Гельмгольц предположил, что именно сжатие солнечного шара является источником его энергии. В этом случае энергия действительно будет выделяться сильнее в недрах Солнца. Причиной же сжатия является

взаимное притяжение частиц, из которых состоит Солнце. Эта гипотеза получила название *к о н т р а к ц и о н н о й*.

Гельмгольц рассчитал, что для обеспечения необходимого количества энергии Солнце должно ежегодно уменьшать свой диаметр на 60—70 метров. При этом он ошибочно предполагал, что Солнце однородно и при сжатии сохраняет свою однородность. Кроме того, во времена Гельмгольца не было точных данных о расходе солнечного тепла и использованные им числа были неверны. Как это нередко бывает, обе ошибки действовали в разные стороны и случайно друг друга компенсировали. Величина сжатия казалась ученым очень маленькой; ее можно было бы обнаружить путем наблюдений только за несколько тысяч лет. Кроме того, факт сжатия Солнца вытекал из общепринятой в то время космогонической гипотезы Лапласа *).

Но вскоре обнаружили и серьезные трудности гипотезы Гельмгольца. Если допустить, что Солнце и в дальнейшем будет сжиматься такими же темпами, то через пять миллионов лет оно сожмется до половины нынешнего объема, а через семь миллионов лет его плотность возрастет вчетверо и станет равной средней плотности Земли ($5,5 \text{ г/см}^3$).

Можно было проследить эволюцию Солнца и в прошлом. Энергия, превращенная в тепло при сжатии Солнца от бесконечных размеров до современных (это даст верхний ее предел), равна полной гравитационной энергии солнечной массы, т. е. энергии, которую необходимо затратить для обратного процесса — выброса ее на бесконечное расстояние. Эта энергия определяется интегралом живых сил и равна для каждой частицы массы m

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{fMm}{r},$$

где M — масса притягивающего тела (т. е. Солнца), f — постоянная тяготения, r — расстояние от центра Солнца. Для шарового слоя радиусом r и толщиной dr необходимая энергия dE равна

$$dE = f \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \frac{4\pi r^2 \rho dr}{r} = \frac{16}{3} \pi^2 f \rho^2 r^4 dr.$$

Будем пока считать вместе с Гельмгольцем плотность постоянной. Беря интеграл от dE (что равносильно последо-

*) См. В. А. Б р о н ш т э н, Беседы о космосе и гипотезах, «Наука», 1968, гл. I.

вательному удалению в бесконечность одного шарового слоя за другим), получим

$$E = \frac{16}{15} \pi^2 f \rho^2 R^5,$$

где R — радиус Солнца. Подставляя $f = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{сек}^2$, $\rho = 1,4 \text{ г/см}^3$, $R = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}$, найдем $E = 2,4 \cdot 10^{48} \text{ эрг} = 2,4 \cdot 10^{38} \text{ кдж}$. Разделив это число на мощность солнечного излучения ($3,8 \cdot 10^{23} \text{ квт}$), мы получим длительность существования Солнца $6,3 \cdot 10^{14} \text{ сек}$, или 20 миллионов лет. Именно такой «возраст» Солнца и получил Гельмгольц. Учет роста плотности солнечного вещества с глубиной еще более сокращал возраст нашего светила.

Некоторым ученым эта оценка показалась достаточной. Но геологи и биологи остались неудовлетворенными. Оценки возраста Земли, основанные на геологических данных второй половины XIX в., требовали по крайней мере в 10—20 раз более продолжительного существования Солнца. А замечательная теория происхождения и эволюции видов, развитая Чарльзом Дарвином, приводила к выводу, что только от появления органической жизни на Земле прошло не менее 500 миллионов лет. Значит, Солнце существует миллиарды лет.

Начались поиски выхода из создавшегося противоречия. Английский геолог Джеймс Кролл, много занимавшийся изучением влияния изменений орбиты Земли на климат и пытавшийся объяснить ими наступление ледниковых периодов, высказал ничем не обоснованную идею о том, что Солнце в прошлом столкнулось с другой звездой и получило от этого столкновения такой запас тепла, что его хватило Солнцу на миллиарды лет. Не говоря о крайне малой, практически ничтожной вероятности такого события, даже если бы оно случилось, полученная энергия была бы вовсе не так велика, как может показаться.

Пусть скорость сближения протосолнца и звезды была 600 км/сек (такова вторая космическая скорость для Солнца, а именно ее бы приобрели оба сближающихся тела). Тогда кинетическая энергия столкновения будет равна

$$E_{\text{кин}} = \frac{Mv^2}{2} = \frac{2 \cdot 10^{33} \cdot (6 \cdot 10^7)^2}{2} = 3,6 \cdot 10^{48} \text{ эрг},$$

что почти равно энергии гравитационного сжатия. Ее хватило бы Солнцу еще на 20 миллионов лет, но отнюдь не на миллиарды лет. Впрочем, Кролл относился с большим

недоверием к оценкам возраста Земли в сотни миллионов лет. «Крайне сомнительно, — говорил он, — чтобы возраст нашей планеты равнялся 240 миллионам лет, сомнительно в особенности потому, что трудно допустить, чтобы Солнце существовало так долго и не сгорело до сих пор».

Эти слова показывают, насколько велико было влияние идей Гельмгольца. Кролл больше доверял расчетам, основанным на его гипотезе, чем геологическим данным, упрямо говорившим о том, что Земля и Солнце много старше, чем следует из контракционной гипотезы.

Более хитрый механизм для объяснения длительного существования Солнца предложил в 1881 г. астроном Уильям Сименс. Он рассматривал Солнце как гигантскую регенерационную печь: энергия солнечного излучения не теряется, а поглощается межпланетным веществом и разлагает молекулы CO_2 , H_2O и другие на атомы. Эти атомы втягиваются Солнцем в ходе его вращения вблизи полюсов и отдают ему запас своей химической энергии. Из экваториальных районов Солнца, напротив, происходит выбрасывание газов, но снова в виде молекул, и все это повторяется многократно. Таким образом, Солнце действует одновременно и как вентилятор, и как регенерационная печь. Источником энергии, приводящей в действие весь этот механизм, является вращение Солнца.

С точки зрения современной астрофизики гипотеза Сименса выглядит крайне наивно. Высокая температура Солнца и мощное ультрафиолетовое излучение не позволят атомам, падающим на Солнце, вновь соединиться в молекулы.

Но даже если бы эта или иная форма регенерации энергии была возможна, не надо забывать, что источником энергии для поддержания всего этого механизма является кинетическая энергия вращения Солнца. Но, как рассчитал тогда же Уильям Томсон (будущий лорд Кельвин), запаса этой энергии Солнцу хватило бы всего... на 116 лет. У. Томсон сам приложил немало усилий для математической разработки гипотезы Гельмгольца и с трудом «дотянул» возраст Солнца до 100 миллионов лет.

Несмотря на все неудачи попыток «подправить» ее, гипотеза Гельмгольца — Кельвина в течение половины столетия считалась наиболее удовлетворительным объяснением источников солнечной энергии. Именно так ее оценивали уже в начале XX в. американский космогонист профессор Ф. Мультон в своей книге «Введение в астрономию» (1906 г.),

известный популяризатор Герман Клейн в «Астрономических вечерах» (1911 г.), историк науки Агнеса Кларк в «Истории астрономии в XIX столетии» (1902 г.).

Не следует, однако, думать, что гипотеза гравитационного сжатия в дальнейшем потеряла всякое значение. Напротив (и такова судьба многих гипотез), в XX в. она заняла почетное место в проблеме звездной эволюции, превратившись в строгую теорию и оставив свои юношеские попытки самостоятельно, без других факторов, объяснить происхождение энергии Солнца и звезд. Нам еще не раз придется с ней встретиться.

Радиоактивность в звездах?

В 1896 г. Анри Беккерель открыл явление естественной радиоактивности урана. Спустя два года Мария Склодовская-Кюри обнаружила это явление у тория, а затем супруги Кюри открыли радий — наиболее интенсивный из радиоактивных элементов.

Как это часто бывает, новые открытия в одной науке получили неожиданное применение в другой. Открытие радиоактивности позволило геологам и геофизикам разработать метод определения возраста горных пород с помощью «урановых часов»: сравнивая количества содержащегося в породе урана и конечного продукта его распада — свинца-206, можно было рассчитать, сколько времени прошло с момента образования той или иной горной породы. Этот метод вскоре позволил окончательно установить, что возраст Земли измеряется миллиардами лет, а значит, возраст Солнца — не меньше. Представление о том, что возраст Земли не превышает 100 миллионов лет, опиравшееся на авторитет лорда Кельвина, было поколеблено, а вскоре навсегда ушло в область истории.

С другой стороны, самопроизвольное выделение энергии при радиоактивном распаде наводило ученых на мысль, что подобный процесс мог происходить и в недрах Солнца. Но какой элемент служил основным поставщиком энергии? Радий? Нет, у него слишком короткий период полураспада — всего 2800 лет. Интенсивность излучения «радиевого» Солнца быстро падала бы: за 20 тысяч лет — в 100 раз, за 40 тысяч лет — в 10 000 раз и так далее.

Уран и торий? Их период полураспада достаточно велик и измеряется миллиардами лет ($4,5 \cdot 10^9$ лет у урана и $14 \cdot 10^9$ лет у тория). Но совершенно невозможно предположить,

чтобы уран и торий, которые на Земле встречаются в ничтожных количествах, составляли заметную долю массы Солнца. Кроме того, «урановое Солнце» давало бы совершенно недостаточный выход энергии.

При радиоактивном распаде происходит некоторая потеря массы: сумма масс продуктов деления на 1/4000 меньше массы первоначального атома. Известный английский астрофизик Джемс Джинс еще в 1904 г. высказал мысль, что энергия Солнца и звезд может возникать за счет «уничтожения материи».

В то время у большинства физиков не было полной ясности в вопросе о взаимоотношении между материей и энергией. Научные и идеологические шатания приводили многих физиков и философов к идее о возможности превращения массы в энергию, а значит, о нарушениях законов сохранения материи и энергии. Эти взгляды были подвергнуты жестокой критике В. И. Лениным в его замечательном философском сочинении «Материализм и эмпириокритицизм» (параграф «Материя исчезла»).

А между тем еще в 1900 г. русский физик П. Н. Лебедев установил экспериментально наличие светового давления и доказал тем самым материальность света, а значит, и любых видов излучения. Наконец, в 1905 г. Альберт Эйнштейн открыл закон эквивалентности массы и энергии $E = mc^2$ (c — скорость света). Теперь мы знаем, что материя не уничтожается при ядерном или радиоактивном распаде, а переходит из одной формы (вещество) в другую (поле излучения). Излучаемые при распаде радия или урана гамма-кванты имеют вполне определенную массу:

$$m = \frac{h\nu}{c^2},$$

где ν — частота излучения, $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$ — постоянная Планка.

Джемс Джинс в течение многих лет деятельно занимался проблемой источников звездной энергии. При этом он не раз бросался из стороны в сторону, пробуя то один, то другой механизм. Известные физикам радиоактивные элементы не обеспечивают выход солнечной энергии? Так, может быть, в недрах Солнца есть еще неизвестные науке элементы? Все места в таблице Менделеева заполнены, но ведь могут существовать элементы и тяжелее урана (в этом Джинс оказался прав, хотя первый трансурановый элемент — нептуний — был открыт только в 1940 г.).

Что же привело Джинса к идее о том, будто в недрах Солнца и звезд могут находиться радиоактивные трансураниевые элементы, выделяющие энергию?

В 1923 г. копенгагенский физик Г. Крамерс опубликовал работу, в которой выводил простые и удобные формулы для расчета коэффициента поглощения рентгеновских лучей атомами водорода и других элементов. Казалось бы, этот вопрос не имеет никакого отношения к источникам звездной энергии. Но Джинс сразу ухватился за формулы Крамерса. Ведь в недрах Солнца и звезд температуры настолько высоки, что излучаться должны именно коротковолновые рентгеновские лучи. А главное, из этих формул следовал тот факт, что коэффициент поглощения пропорционален отношению Z^2/A , где Z — атомный номер, а A — атомный вес поглощающего элемента. Но это отношение растет по мере продвижения вдоль таблицы Менделеева от легких элементов к тяжелым. Оно равно единице для водорода, 5,2 — для натрия, 12 — для железа, 33 — для свинца, 36 — для урана.

С другой стороны, коэффициент поглощения излучения входит в соотношение, связывающее светимость звезды с ее массой. Кроме него в это соотношение входят температура поверхности звезды и эффективный молекулярный вес вещества звезды. Температура и светимость определяются непосредственно из наблюдений звезд, массы легко определить с помощью III закона Кеплера для двойных звезд (для одиночных звезд они находятся иначе, но также по данным наблюдений). Таким образом, можно было по наблюдательному материалу определить среднее значение коэффициента поглощения звездного вещества.

Эту работу и проделал Джинс в 1926 г. Результаты были поразительны. Большинство значений Z^2/A , определенных таким путем, соответствовало элементам т я ж е л е е у р а н а. Кроме того, выявился еще один любопытный факт: наибольшие значения отношения Z^2/A соответствовали звездам, которые, по представлениям Джинса, были наиболее молодыми. По мере старения звезд злополучное отношение убывало. Получалось, что энергия в недрах звезд создается за счет превращения элементов (при том тяжелых, трансураниевых) в более простые, легкие. Вот откуда вывел Джинс свою гипотезу о радиоактивном распаде трансураниевых элементов в недрах звезд.

Надо сразу же оговориться, что представления о возрасте и направлении эволюции звезд у Джинса были

довольно путанные и неправильные. Основным признаком, определявшим возраст звезды, Джинс считал ее массу. Зная, сколько массы теряет звезда за счет излучения, он мог рассчитать, сколько лет назад ее масса была в 2, 4, 10, 100 раз больше современной. Так как звезд с очень большими массами (больше 100 масс Солнца) не существует, то из этих расчетов можно было оценить сравнительный возраст звезд.

К вопросу о возрасте и направлении эволюции звезд мы вернемся ниже, здесь же мы хотели лишь пояснить ход рассуждений Джинса.

Его гипотеза о радиоактивном распаде трансураниевых элементов в недрах звезд не получила поддержки у других ученых. Она была основана на единственном, хотя и довольно прочном (как считал Джинс) основании — на формулах Крамерса. Правда, Джинс приводил и другие доводы: ближе к центру звезды должны были, по его мнению, концентрироваться более тяжелые атомы. А кроме того, атомы легче атомов урана не могли, как мы уже видели, обеспечить наблюдаемый поток энергии, излучаемой Солнцем, в течение достаточно длительного времени.

Но «прочное» основание оказалось не таким уж прочным. Правда, более точные квантовомеханические расчеты вскоре подтвердили справедливость формул Крамерса для водорода и водородоподобных атомов. Но применение их для других атомов и ионов (а таких большинство) могло привести к ошибкам, доходящим до двух порядков (т. е. в сотню раз). А самое главное, в 1939 г. американский астрофизик Р. Вильдт показал, что основным, и притом весьма мощным поглощающим агентом в недрах звезд являются не атомы металлов, как полагали до этого теоретики (наталкиваясь из-за этого на целую серию противоречий), а отрицательные ионы водорода — протоны с двумя электронами вместо одного. Но у второго электрона энергия связи, удерживающая его вблизи атома водорода, очень мала — всего лишь 0,75 электрон-вольта (чтобы оторвать первый, основной электрон, надо затратить почти в 20 раз большую энергию). Поэтому излучение, идущее из недр звезды, интенсивно расходуется на отрыв присоединенных электронов и на превращение отрицательных ионов водорода в нормальные атомы.

Так разрушилось «прочное основание» гипотезы Джинса. Но еще задолго до этого астрофизики обратились к другим возможным источникам звездной энергии.

Аннигиляция? Синтез элементов?

В 1897 г. известный английский физик Дж. Дж. Томсон, много лет возглавлявший кембриджскую школу физиков, открыл элементарную частицу материи, заряженную отрицательно, — электрон. Было еще далеко до того времени, когда Пол Дирак докажет необходимость существования такой же положительной частицы — позитрона. Это случится лишь в 1928 г., а экспериментально позитрон будет обнаружен еще четырьмя годами позже. Но мысли о «положительном электроне» уже витали в воздухе на рубеже двух столетий.

В 1900 г. еще один кембриджский физик-теоретик Джозеф Лармор выпустил книгу «Эфир и материя», в которой описывал образование положительного и отрицательного электронов при вращении силовой трубки вокруг внутренней оси. Далее Лармор осторожно указывал на возможность спадающих стенок трубки, сопровождающегося уничтожением обоих электронов и выделением энергии.

Но положительный электрон обнаружить пока что не удавалось, а протон уже был открыт. Ядра атомов считались состоящими из протонов и электронов (нейтрон тоже был неизвестен). Поэтому первой формой гипотезы а н н и г н и л я ц и и — взаимного уничтожения положительных и отрицательных частиц — было представление о возможности столкновения протонов и электронов.

Уже в 1904 г. Джеймс Джинс высказал предположение о том, что энергия Солнца и звезд образуется в результате подобного процесса. Но серьезная попытка применить эту идею к объяснению, откуда берется энергия звезд и Солнца, была предпринята лишь спустя 20 лет почти одновременно двумя учеными. Один из них был американский астроном Генри Норрис Рассел, широко известный своими исследованиями в астрофизике, звездной астрономии и космогонии, один из авторов знаменитой «диаграммы Герцшпрунга — Рассела», создатель одной из первых теорий звездной эволюции. Другой — не менее выдающийся английский астрофизик, специалист в области физики звезд Артур Стенли Эддингтон. Джинс назвал Рассела и Эддингтона соответственно отцом и отчимом гипотезы об аннигиляции как источнике звездной энергии, потому что Рассел опубликовал свою работу с изложением этой гипотезы в английском журнале «Нейчур» («Природа») в августе 1925 г., а Эддингтон — девятью месяцами позже, в мае 1926 г.

Рессел и Эддингтон не могли дать строгой теории предложенного ими механизма. Более того, они ясно видели стоящие на пути трудности, физические и астрономические. В своей книге «Внутреннее строение звезд», изданной в 1926 г., Эддингтон так оценивал положение:

«Я думаю, что чистый физик склонен рассматривать наши рассуждения о субатомной энергии как неосновательные домыслы; если это так, то он глубоко заблуждается относительно положения астронома. Здесь нет неограниченной фантазии, далекой от наблюдаемых фактов. У астронома очень много фактов, и он чувствует обязанность как-то комбинировать эти факты, чтобы навести порядок».

Эддингтон попробовал сам «навести порядок» среди астрономических фактов. Он сравнил физические свойства Солнца и звезды-гиганта Капеллы, имеющей ту же температуру поверхности, что и Солнце. С единицы поверхности Капелла излучает столько же энергии, сколько и Солнце, но с единицы массы — в 30 раз больше. С другой стороны, средняя плотность Солнца в 620 раз превосходит плотность Капеллы, а температура в соответственных точках (т. е. на тех же долях радиуса) у Солнца в 4 с лишним раза больше, чем у Капеллы. Казалось бы, скорость освобождения внутриатомной энергии, если только она зависит от температуры и плотности, должна возрастать у более горячих (в недрах) и плотных звезд. Получалось же как раз наоборот.

Возможный ответ состоял в том, что Солнце — более старая звезда, а Капелла черпает энергию из более щедрого источника, который на Солнце уже исчерпан. Это вводило для интерпретации астрономических данных, помимо двух уже известных нам факторов: температуры и плотности, третий, усложняющий фактор — степень истощения запасов энергии.

Но Капелла — двойная звезда. Она состоит из двух неравных по массе звезд-компонент. Можно полагать, что они имеют равный возраст, т. е. образовались одновременно (как полагал Эддингтон, путем разделения одной большой звезды, но это в данном случае не играет роли). Поскольку более массивная звезда должна была излучать больше энергии на единицу массы, ее запасы энергии должны были истощиться в большей степени, чем у второй звезды. Но... более массивная звезда с «оскудевшими» запасами энергии, да вдобавок с меньшей температурой и плотностью, излу-

чает не слабее, а сильнее (в расчете на единицу массы), чем меньшая компонента. «Крайне пелепый парадокс!» — восклицает по этому поводу Эддингтон.

Оставалось, однако, еще одно предположение. Допустим, что запас энергии в звездах практически неистощим, но механизм использования его включается лишь при определенных условиях, например при достижении в недрах звезды некоторой критической температуры. Пока эта температура не достигнута, излучение звезды поддерживается за счет каких-то других, не столь мощных источников внутриатомной энергии (например, за счет синтеза элементов, о котором речь будет идти ниже). Но если звезда разогреется до критической температуры, начинается аннигиляция протонов и электронов, и звезда начинает как бы пожирать самое себя. Ее масса будет, хотя и медленно, но постепенно уменьшаться. Между тем, если допустить, что основным источником звездной энергии является синтез элементов, сколько-нибудь заметной потери массы звезда испытывать не будет. Идея Эддингтона о критической температуре впоследствии полностью подтвердилась, хотя и ее значение, рассчитанное Эддингтоном (40 миллионов градусов), и предполагавшийся им механизм освобождения энергии оказались ошибочными.

И Эддингтон, и Рассел, и Джинс учитывали возможность другого, альтернативного механизма рождения энергии в недрах звезд — за счет синтеза элементов. И в первую очередь синтеза гелия из водорода.

Идея синтеза элементов еще в 1914—1916 гг. буквально «носилась в воздухе». Ее высказали независимо В. Харкисс, Мак-Миллан и некоторые другие физики.

В 1918 г. ученик Дж. Дж. Томсона Френсис Астон, все в том же Кембридже, с помощью сконструированного им нового прибора — масс-спектрометра смог определить точные атомные веса водорода и гелия. Оказалось, что атом гелия содержит лишь 3,97 массы атома водорода, а не ровно 4,00, как следовало ожидать. Дефект массы составлял примерно $1/130$ массы самого атома. По-видимому, эта величина представляла собой ту долю вещества, которая превращалась в излучение. Значит, при образовании одного атома гелия из четырех атомов водорода выделялось какое-то количество энергии, которое нетрудно было подсчитать по формуле Эйнштейна $E = mc^2$. Оно равнялось

$$0,03 \cdot (1,67 \cdot 10^{-24}) \cdot (9 \cdot 10^{20}) = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ эрг.}$$

Вспомнив, что за одну секунду Солнце излучает $3,8 \cdot 10^{33}$ эрг энергии, мы легко найдем, что ежесекундно в недрах Солнца должно синтезироваться примерно 10^{38} атомов гелия. Переводя это число в граммы, мы получим, что на Солнце за секунду должно перерабатываться в гелий $7 \cdot 10^{14}$ г водорода, за год $2 \cdot 10^{22}$ г, или $2 \cdot 10^{16}$ т, за миллиард лет $2 \cdot 10^{25}$ т, т. е. около одного процента солнечной массы. Потеря массы за счет излучения составляла при этом менее 0,01% массы Солнца.

Но как «собрать» атом гелия из четырех атомов водорода? Вероятность того, чтобы четыре атома одновременно столкнулись между собой даже в условиях тех высоких температур и плотностей, что царят в недрах звезд, крайне мала. Она не может обеспечить нужного количества таких «четверных» столкновений, а значит, и образования необходимого количества энергии. Гипотеза синтеза зашла в тупик. Надо было как-то разобраться в возникших противоречиях. «К несчастью, факты до сих пор мы укладываемся в удовлетворительную схему, и до сих пор мы ищем ключ», — так характеризовал положение в 1926 г. Артур Эддингтон.

Ключом к пониманию проблемы источников звездной энергии должно было явиться решение вопроса: расходует ли звезда на протяжении своей жизни значительную долю своей массы или нет?

О чем говорят спектры

Эддингтон был совершенно прав, говоря, что у астронома слишком много фактов и он обязан навести в них порядок. К началу XX в. наблюдательная астрономия добилась больших успехов. По наблюдениям двойных звезд с помощью обобщенного III закона Кеплера можно было определять их массы. Созданная трудами В. Вина, Дж. Рэлея, М. Планка теория распределения энергии в спектрах звезд позволила определять их поверхностные температуры и интенсивность излучения с единицы поверхности. Но зная расстояние до звезды и ее видимый блеск (звездную величину), можно было определять ее полную силу света (светимость), а поделив ее на интенсивность излучения с единицы поверхности, определять величину этой поверхности, а значит, и радиусы звезд. По массе и радиусу легко определяется средняя плотность звезды. Но это было далеко не все.

Спектральный анализ, могучее оружие астрофизики, пущенное в ход во второй половине XIX в., давал в руки

астрономов богатую информацию, которую не так просто было освоить и понять. Спектры разных звезд отличались друг от друга. У одних звезд наблюдались в основном интенсивные линии поглощения водорода. У других (как у Солнца) эти линии были сравнительно слабы, но зато проявлялись многочисленные линии металлов: натрия, кальция, магния, железа. У третьих звезд наблюдались какие-то еще непонятные линии, напоминавшие линии водорода, но сильно смещенные. Были обнаружены и такие звезды, у которых в спектре наблюдались наряду с темными и яркие линии.

Надо было как-то разобраться в этих особенностях, классифицировать звездные спектры, а затем сравнить их с другими, уже известными характеристиками звезд.

Первую попытку создать классификацию звездных спектров предпринял в 1863—1868 гг. итальянский астрофизик Анджело Секки. Изучив (притом визуальным методом!) спектры около 4000 звезд, сопоставив их тщательные зарисовки, он разделил все звездные спектры на 4 типа: I тип — белые и голубовато-белые звезды с сильными водородными линиями, II тип — желтые звезды с многочисленными линиями металлов в спектре, III и IV типы — красноватые звезды с полосами, имевшими оттенки (канты) с красной и с фиолетовой стороны соответственно. Классификация Секки, уточненная Г. Фогелем, применялась около 30 лет, пока не была заменена более совершенной Гарвардской классификацией.

Значительный сдвиг в этой области произошел после того, как в 1872 г. Генри Дрэпер в США сумел сфотографировать спектр звезды. Одновременно фотографирование звездных спектров начал Уильям Хеггинс в Англии. До своей смерти (в 1882 г.) Генри Дрэперу удалось получить фотографии спектров всего 50 звезд. Он, вероятно, не мог и подумать, что через 8 лет после его смерти выйдет в свет первый «Каталог Генри Дрэпера» (Henry Draper Catalogue), содержащий спектры 10 000 звезд. Гарвардская обсерватория, которой Дрэпер завещал свои приборы и средства, под руководством неутомимого энтузиаста этого дела Эдуарда Пикеринга начала систематически фотографировать и анализировать спектры звезд. В 1897 г. мисс Антония Мори разработала сложную классификацию звездных спектров с 24 классами. Именно из-за своей сложности эта классификация не привилась. Более удобную классификацию, применяемую и поныне, предложила мисс Энн Кеннон. А в 1918—1924 гг. был издан девятитомный боль-

шой Henry Draper Catalogue, содержащий 225 000 спектров звезд! Номера по этому каталогу с прибавлением букв HD (Henry Draper) употребляются до сих пор для обозначения и спектров и самих звезд (особенно спектрально-двойных).

Вот как выглядит Гарвардская классификация спектров звезд (спектральные классы в ней обозначаются большими буквами латинского алфавита) (рис. 1).

O — горячие голубые звезды с весьма заметными линиями ионизованного гелия, ионов азота, углерода и кислорода; температура на поверхности 20—30 тыс. градусов.

B — бело-голубые звезды с преобладающими линиями нейтрального гелия; заметны также линии водорода, азота, углерода, кислорода и кремния; температура около 15 000°; такие спектры имеют, например, звезды пояса Ориона.

A — белые звезды с интенсивными линиями водорода; температура около 10 000°; примеры — Сириус, Вега.

F — беловато-желтые звезды; наряду с линиями водорода появляются линии металлов и их ионов; температура 8000°; примеры — δ Близнецов, Канопус.

G — желтые звезды с многочисленными линиями металлов и ослабленными линиями водорода; температура 6000°; примеры — Солнце, Капелла.

K — оранжевые звезды с усиленными линиями ионизованного кальция; начинают появляться полосы окиси титана; температура 4500°; примеры — Арктур, Альдебаран.

M — красные звезды с полосчатым спектром (преимущественно окиси титана); температура 3000°; примеры — Антарес, Бетельгейзе.

N, R, S — очень красные звезды с выделяющимися полосами молекул окиси углерода и циана (R, N) и окиси циркония (S). Звезды этих классов (как и класса O) очень редки; температура их около 2000°.

Убывание температуры по мере перехода от звезд классов O и B к классам M и N навело Г. Фогеля на мысль, что именно таков путь эволюционного развития звезд. Поэтому спектральные классы O—F стали называть «ранними», а G—S — «поздними». Но вскоре выявилось еще одно интересное обстоятельство.

Еще в 1897 г. мисс Мори заметила, что у одних звезд поздних спектральных классов линии некоторых элементов выглядят широкими, а у других звезд тех же классов — узкими, но усиленными. Вскоре выяснилось, что поведение этих линий удивительным образом связано со

светимостью звезд. Какое значение это имело для физики звезд и звездной астрономии вообще, мы скоро узнаем.

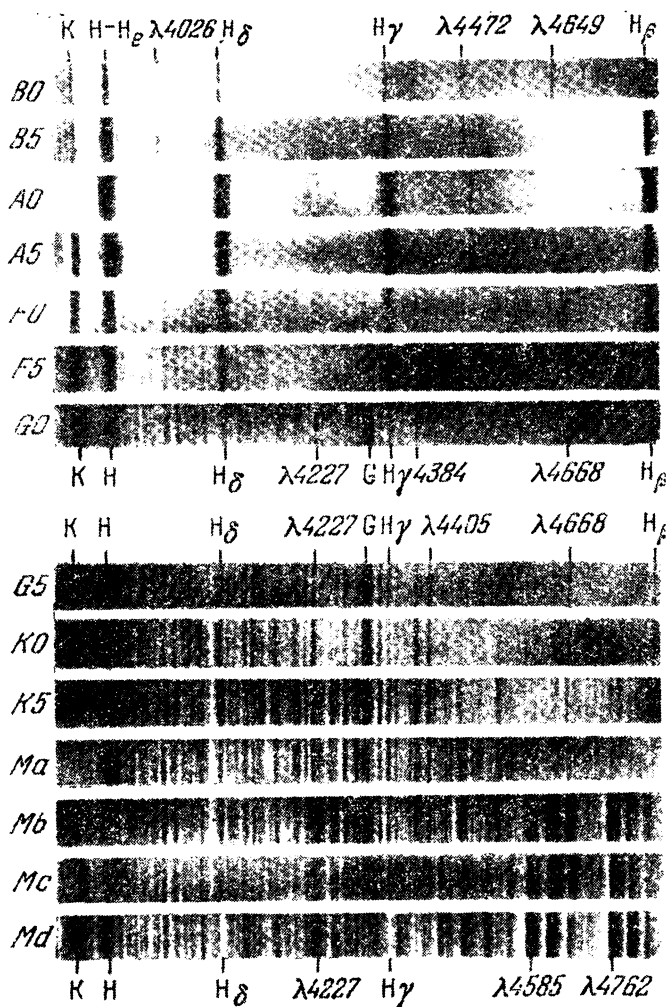


Рис. 1. Гарвардская классификация спектров.

В 1900 г. известный спектроскопист и теоретик Норман Локиер обратил внимание на то, что самые узкие линии, найденные мисс Мори (которые она назвала с-линиями),

соответствуют линиям искрового спектра, в отличие от других линий, присутствующих только в дуговом спектре. Теперь мы знаем, что линии искрового спектра соответствуют ионизованным атомам. Почему же у различных звезд с одной и той же температурой атомы либо сильно ионизованы, либо нейтральны?

Что такое главная последовательность

В 1905 г. датский астроном Эйна́р Герцшпру́нг сделал важный шаг вперед: он впервые сопоставил особенности спектров звезд с их светимостью. Выяснилось, что звезды поздних классов (от G до M) резко разделяются на две группы: с очень большой и очень малой светимостью. Герцшпрунг назвал их гигантами и карликами. Действительно, поскольку температура у всех звезд одного и того же спектрального класса одинакова, полная светимость звезды зависит только от ее размеров. Проведенные, начиная с 1919 г., прямые измерения диаметров звезд с помощью интерферометра Майкельсона подтвердили, что звезды-гиганты действительно во много раз больше Солнца, и дали хорошее согласие с определениями размеров звезд по их светимостям.

Что касается с-звезд мисс Мори, то они оказались еще больше обычных гигантов. Их называли сверхгигантами.

Через несколько лет после Герцшпрунга к изучению связи между спектрами и светимостью звезд обратился уже известный нам Генри Норрис Рассел, построивший в 1913 г. стройную диаграмму «спектр — светимость», которую называют также диаграммой Герцшпрунга — Рассела или G—P-диаграммой. По вертикальной шкале в ней отложены логарифмы светимости, а по горизонтальной — спектральные классы. Светимость Солнца принята за единицу (рис. 2).

Тут сразу же выявилась интересная особенность этой диаграммы. Звезды не заполняли ее равномерно — они располагались двумя расходящимися ветвями. Одна из них, к которой принадлежало большинство звезд, шла по диагонали вниз и вправо; другая шла почти горизонтально слева направо и состояла из звезд-гигантов. Первая получила название «главная последовательность», вторая — «ветвь гигантов». Солнце, принадлежащее к спектральному классу G и имеющее светимость 1, находилось почти точно в середине главной последовательности.

После того как Рессел построил в 1913 г. свою диаграмму, стало возможно связать интенсивность и ширину линий в звездных спектрах со светимостью звезд. Метод такого количественного сопоставления разработали астрономы американской обсерватории Маунт Вилсон У. Адамс и Кольшоттер. В 1914—1918 гг. они, опираясь на звезды, свети-

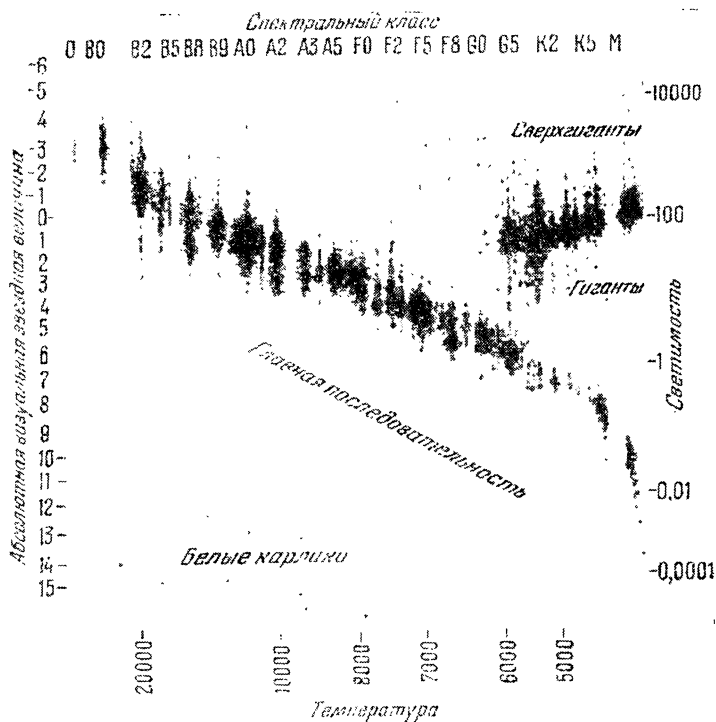


Рис. 2. Диаграмма Гершпрунга — Рессела (Г — Р-диаграмма).

мости которых были определены по известным расстояниям и видимому блеску, обратили задачу и стали определять светимости звезд по интенсивности некоторых характерных спектральных линий. Зная же светимость и видимый блеск звезды, можно было определить расстояние до нее. Возможности звездной астрономии сразу расширились — новый метод позволял измерять расстояния до 1500 световых лет, тогда как до этого старым методом

годовых параллаксов, верно служившим астрономам 80 лет, можно было мерить расстояния, не превышавшие 300 световых лет.

Получив в руки новое оружие для исследования физических свойств звезд, астрономы немедленно широко им воспользовались. В 20-х годах было завершено в основном построение теории звездных атмосфер. Стало ясно, почему отличаются ширина и интенсивность спектральных линий у гигантов и карликов, несмотря на одинаковую температуру. Гиганты оказались намного разреженнее, чем карлики. Плотности звезд-гигантов оказались в сотни и тысячи раз меньше, чем у Солнца, а у сверхгигантов — в сотни тысяч раз. Поведение спектральных линий зависит от состояния атомов, а последнее — от температуры и плотности газа. При низкой плотности облегчаются процессы возбуждения и ионизации атомов. Вот почему у звезд-сверхгигантов так выделялись с-линии искрового спектра.

Но почему звезды располагались на диаграмме Герцшпрунга — Рессела случайным образом? Видимо, в этом заключался какой-то смысл. Было ясно, что такое расположение звезд как-то связано с их эволюцией. Но как? Что представляла собой главная последовательность, к которой принадлежало наше Солнце?

Звездные модели

Чтобы представить себе, как развивается звезда, надо было знать, как она устроена. Наблюдения давали нам радиус, массу, среднюю плотность звезды и температуру на поверхности. Но как изменяются плотность и температура с глубиной по мере перехода от поверхности звезды к ее недрам? Ясно, что они должны расти, но по каким законам? И как переносится тепло внутри звезды: излучением или конвекцией? Эти вопросы тоже требовали ответа. И ученые давно уже пытались найти этот ответ.

Вернемся опять на полстолетия назад, все к тому же 1862 году. Пока Анджело Секки прилаживал свой спектроскоп к телескопу Ватиканской обсерватории, в далекой Англии Уильям Томсон (Кельвин), изучая термодинамику земной атмосферы, ввел понятие конвективного равновесия. Это был первый краеугольный камень, заложенный в теорию внутреннего строения звезд.

«Всякую сплошную среду, — писал Кельвин, — подверженную влиянию гравитации, будем называть находящейся

в конвективном равновесии, если плотность и температура распределены по всей среде таким образом, что поверхности равной плотности и равной температуры остаются неизменными» в случае действия на среду малых возмущений.

Сущность конвективного равновесия, поясняет далее Кельвин, состоит в следующем. Выделим в газовой среде какой-нибудь малый объем и изолируем его от теплообмена с окружающей средой. Если наш объем, расширяясь или сжимаясь, достигнет плотности среды, какую она имеет в некоторой другой точке, то и температура его будет равна температуре среды в этой точке. При этом соотношения между давлением p , плотностью ρ и температурой T будут выглядеть так:

$$p = \text{const} \cdot \rho^\gamma; \quad p^{1-\gamma} T^\gamma = \text{const}; \quad T \rho^{1-\gamma} = \text{const},$$

где $\gamma = c_p/c_v$ — отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме. Изменения состояния газа, подчиняющиеся этим соотношениям, называются адиабатическими и характерны тем, что изучаемый нами объем газа не получает и не отдает тепла ($dQ = 0$).

Но, как показал Кельвин, можно обобщить эти соотношения на случай наличия притока или оттока тепла, лишь бы величина этого притока была пропорциональна изменению температуры ($dQ = c dT$). Правда, в этом случае вместо γ надо взять $\gamma' = (c_p - c)/(c_v - c)$. Изменения состояния газа, описываемые такими обобщенными соотношениями, носят название политропических. Адиабатические процессы — частный случай политропических при $c = 0$.

Соотношение между давлением и плотностью в политропическом процессе можно выразить и так:

$$p = K \rho^{1 + \frac{1}{n}},$$

причем величина n носит название показателя политропы. Она играет важную роль в теории конвективного равновесия. Для земной атмосферы $n = 5/2$.

Выводя уравнение адиабатического и политропического равновесия, Кельвин еще не предполагал, что его можно применить для изучения внутреннего строения Солнца и звезд. Это сделал спустя восемь лет американский физик Гомер Лейн. Любопытно заглавие его работы (1870 г.):

«О теоретической температуре Солнца при гипотезе газовой массы, сохраняющей свой объем при помощи внутреннего тепла и зависящей от газовых законов, известных из земных экспериментов».

Сначала Лейн интересовался лишь температурой поверхности Солнца, которая тогда еще не была известна. Как определить ее, зная количество лучистой энергии, испускаемой с единицы поверхности Солнца? «По закону Стефана — Больцмана», — скажет теперь любой студент *). Но Лейну этот закон тоже был неизвестен: лишь через 10 лет Стефан нашел его эмпирически и через 15 лет Больцман дал ему теоретическое объяснение. Лейн вынужден был использовать данные экспериментов по излучению энергии нагретыми поверхностями и проэкстраполировать их в сторону больших энергий излучения. Неудивительно, что он допустил довольно большую ошибку: температуру поверхности Солнца он оценил в $30\,000^\circ$, в пять раз больше, чем в действительности.

Следующей задачей, которую поставил и решил Лейн, было определение плотности солнечного вещества у поверхности. Для этого он должен был рассмотреть равновесие Солнца как целого. Вот тут и пригодились условия конвективного равновесия, введенные Кельвином. Используя их и доказав, что в недрах Солнца молекулы должны раздробиться на атомы в ходе взаимных «жестоких столкновений», Лейн нашел, что показатель политропы солнечного вещества должен равняться $3/2$. Затем он решил задачу равновесия газового шара, находящегося под действием собственного гравитационного поля и подчиняющегося политропическому закону $p = K\rho^{1 + \frac{1}{n}}$. Распределение температуры с расстоянием от центра Солнца выразилось довольно сложным дифференциальным уравнением (его потом стали называть уравнением Лейна — Эмдена), которое решалось до конца только при $n = 0$, $n = 1$ и $n = 5$. Для $n = 3/2$ решить уравнение точно не удавалось (и не удалось до сих пор), поэтому Лейн применил испытанный приближенный метод: разложил функцию, выражающую зависимость температуры от относительного расстояния, в ряд по степеням этого расстояния, а потом вычислил

*) Напомним формулу этого закона: $E = \sigma T^4$, где E — лучистая энергия с единицы поверхности, T — температура (в градусах Кельвина), $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-9}$ эрг/см² · град⁴ · сек — постоянная Стефана — Больцмана.

ее значения для заданных расстояний. Эту функцию Кельвин назвал «функцией Гомера Лейна», а впоследствии она получила название функции Лейна — Эмдена. (Читатель, конечно, заметил, что уже второй раз к фамилии Лейна мы присоединяем фамилию некоего Эмдена. С этим ученым мы скоро познакомимся, а пока пусть читатель не сомневается, что эту честь он вполне заслужил.)

Итак, распределение температуры Солнца с глубиной было построено. После этого не составляло труда, используя политропические соотношения, найти распределение плотности и давления. Плотность вещества Солнца у поверхности получилась у Лейна $0,00036 \text{ г/см}^3$. Это примерно в 2000 раз больше современного значения, но не надо забывать, что Лейн принимал температуру поверхности Солнца в $30\,000^\circ$, а такого значения температура Солнца достигает на глубине в 4000 км. Если сравнить результат Лейна с плотностью Солнца на этом уровне, то окажется, что он ошибся лишь в 20 раз.

Несмотря на эту ошибку, работа Лейна явилась замечательным достижением. Он стал, как отмечает известный индийский астрофизик С. Чандрасекар, не только первым исследователем физических условий в атмосфере Солнца, но и первым исследователем звездных недр, хотя сперва эта проблема его не интересовала.

С именем Лейна связана одна очень важная теорема. Она позволяет от значений функции Лейна — Эмдена для данного относительного расстояния от центра газового шара перейти к значению этой функции для любого другого расстояния. Это — очень удобный закон подобия для распределения температуры, плотности и давления в звездах. Если звезда (или вообще газовый шар) расширяется или сжимается так, что все ее части изменяют свои размеры в одном и том же отношении (такое расширение — сжатие называется однородным), то, согласно теореме Лейна, температура, плотность и давление в каждой точке изменяются обратно пропорционально первой, третьей и четвертой степени этого отношения соответственно. Таким образом, теорема Лейна позволяла рассчитать изменение состояния звезды при ее расширении или сжатии.

Любопытна история этой теоремы, называемой также именем Лейна. В его работе никаких явных указаний на эту теорему нет. Но когда работой Лейна заинтересовался известный американский астроном Саймон Ньюком, Лейн сообщил ему об этой теореме и даже дал краткое и простое

доказательство. Когда в 1876 г. в Америку приехал Томсон (Кельвин), Ньюком рассказал ему о теореме Лейна и попытался воспроизвести доказательство, но позабыл его. Встретившись после этого с Лейном, Ньюком попросил его написать доказательство специально для Кельвина и вскоре отправил его английскому физику. Кельвин сразу же оценил значение теоремы и впоследствии опубликовал ее, но это было уже в 1887 г.

Между тем в конце 70-х годов проблемой равновесия звезд заинтересовался немецкий физик А. Риттер. За шесть лет (1878—1883) он опубликовал в одном и том же журнале («Wiedemann Annalen») 18 коротких сообщений, в которых, совершенно независимо от Лейна (с работами которого он не был знаком), он выводил закон Лейна и вычислял функцию Лейна — Эмдена для различных значений показателя политропы. Но Риттер пошел дальше и вывел уравнения для внутренней и потенциальной энергии звезды, впервые рассмотрел вопрос о пульсациях газового шара и доказал, что период этих пульсаций обратно пропорционален квадратному корню из плотности звезды. Риттер нашел и условие, отделяющее устойчивые конфигурации звезд ($\gamma > 4/3$) от неустойчивых ($\gamma < 4/3$). В двух последних своих работах Риттер впервые попробовал рассмотреть теорию звездной эволюции для звезд различной массы (по современной терминологии — для гигантов и карликов), и здесь он высказал пророческую идею о том, что наибольшая светимость, какой может достигнуть звезда, зависит от ее массы.

Но дальше исследование этой проблемы замедлилось. За 35 лет, следовавших после опубликования работы Лейна, за исключением 18 статей Риттера, в печати появилось лишь 10 работ, в той или иной степени дополнявших и развивавших результаты Лейна и Риттера.

Десять работ за треть века! Сейчас ежегодно только по проблеме внутреннего строения звезд публикуется свыше 300 работ. Темпы развития науки стали в наше время иными, отражая общее ускорение развития всего человечества.

Но шестьдесят пять лет назад ученые не спешили. Наступил 1907 год, и вышла в свет одиннадцатая работа по этой проблеме. Но тут мы должны сделать небольшое отступление.

23 августа 1960 г. Американское астрономическое общество организовало в Мексико-Сити (США) специальную лекцию, посвященную памяти Генри Норриса Рессела,

скончавшегося за три года до этого. На трибуну поднялся невысокий человек с постоянной улыбкой на лице и заговорил:

«Я начну с краткого экскурса в историю, рассказав о моем дяде».

Те, кто не знал докладчика и его родословную, могли удивиться такому вступлению. Но докладчик продолжал, и вскоре все стало на свои места.

«Мой дядя Роберт Эмден написал в 1907 г. книгу, которая была первым фундаментальным трудом по внутреннему строению звезд. В этой книге он использовал рабочую гипотезу, что в любой звезде конвекция является единственным механизмом, переносящим на поверхность энергию, выделяющуюся в глубоких внутренних слоях. На основании этой рабочей гипотезы он построил свое знаменитое семейство политропных моделей».

Так вот кто такой был Роберт Эмден. Его книга «Газовые шары» составила эпоху в истории изучения звездных конфигураций. В ней Эмден не только систематизировал результаты предыдущих исследований (в том числе Лейна и Риттера), но и получил ряд новых результатов, а кроме того, дал таблицы нужных функций. Главная заслуга Эмдена состояла в строго систематическом исследовании общих решений уравнений конвективного равновесия звезды.

Но вернемся к лекции в Мексико-Сити. Рассказав о заслугах своего дяди, Роберта Эмдена, лектор... Но пришла пора представить вам и самого лектора: американский астрофизик Мартин Шварцшильд, крупнейший современный специалист в области теории внутреннего строения звезд, пионер исследований небесных светил с помощью приборов, установленных на стратостатах. Выходец из Германии, он был вправе гордиться не только своим дядей, но и своим отцом. Отец его, Карл Шварцшильд, был весьма разносторонним ученым: одновременно и прекрасный наблюдатель, и выдающийся теоретик, занимался и физикой звезд, и проблемой строения звездных систем. И в своей ресселовской лекции сын не забыл упомянуть об отце, тем более что это было как нельзя кстати.

«Примерно в то же время, — продолжал М. Шварцшильд, — мой отец обнаружил, что при высоких температурах внутри звезд необычайно эффективным механизмом переноса энергии от внутренних слоев к наружным может быть также излучение. В связи с этим он развил представление о лучистом равновесии и применил его к атмосфер-

ным слоям Солнца. При этом он показал, что атмосфера Солнца находится скорее в лучистом, чем в конвективном равновесии. Он нашел также общий критерий, позволяющий установить, находится ли данный слой звезды в конвективном или в лучистом состоянии. Наконец, он предположил, что при переходе к более глубоким слоям под атмосферой мы покидаем слои, находящиеся в лучистом равновесии, и переходим в конвективную зону».

Эта работа Карла Шварцшильда, опубликованная в 1906 г., сыграла важную роль в разработке теории лучистого переноса энергии, теории строения звездных атмосфер и, как мы смогли убедиться, теории внутреннего строения звезд. Итак, вещество звезды могло находиться либо в лучистом, либо в конвективном равновесии. Что такое конвективное равновесие, мы знаем. Надо сказать несколько слов и о лучистом равновесии.

Представим себе некоторый элементарный объем внутри звезды. С одной стороны, он будет непрерывно поглощать часть энергии излучения, приходящего извне через ограничивающую его поверхность. С другой стороны, объем сам будет излучать. Условие лучистого равновесия заключается в том, что количество энергии излучения, поглощаемой объемом, равно количеству энергии, испускаемой им. Если это условие выполняется в данной зоне звезды, можно утверждать, что эта зона находится в состоянии лучистого равновесия.

Прошло целых 20 лет после опубликования работ К. Шварцшильда и Р. Эмдена, и Артур Эддингтон написал вторую фундаментальную монографию о внутреннем строении звезд. Но вот что интересно: если Эмден строил свои модели целиком на основе теории конвективного равновесия, а К. Шварцшильд допускал двуслойное состояние звезды с переходом от лучистой оболочки к конвективной зоне, то Эддингтон предположил, что во всех звездах от центра до поверхности царит лучистое равновесие и никакой конвекции нет.

В этом вопросе требовалось разобраться. Нужно было провести детальное рассмотрение вопроса о соотношении между лучистым и конвективным переносом энергии. Несколько ученых (А. Унзольд, Л. Бирман, Т. Каулинг), начиная с 1930 г., посвятили этому вопросу свои исследования. Шло последнее десятилетие перед открытием подлинного источника энергии Солнца и звезд. Но астрофизики не ждали, пока это открытие будет преподнесено им на золотом блюде.

Прежде всего, надо ясно представить себе, что в нагретом до нескольких тысяч градусов газе лучистый перенос тепла будет обязательно, а конвекция может возникнуть лишь при определенных условиях. Такие условия наступят, если градиент температуры (скорость ее изменения с высотой) окажется больше, чем при адиабатическом равновесии (см. стр. 29). В этом случае нагретый объем газа, поднимаясь вверх, не успевает охладиться до температуры внешней среды и стремится подняться еще выше. Возникшие вертикальные токи газа не затухают, а, наоборот, непрерывно поддерживаются. Градиент температуры в ходе конвекции несколько снижается, но остается чуть выше адиабатического.

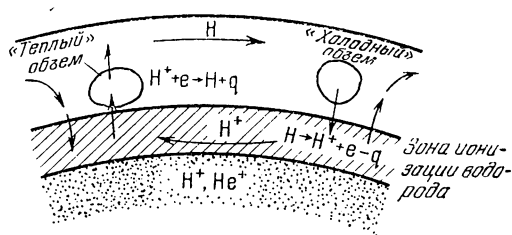


Рис. 3. Зона ионизации водорода и конвекция в звезде.

Немецкий астрофизик А. Унзольд в 1930 г. отметил, что ионизация водорода уже на небольших глубинах (где температура достигает $10\,000^\circ$) порождает мощную конвекцию (рис. 3). Действительно, с подъемом некоторого объема газа, содержащего ионизованный водород, в нем начинается рекомбинация ионов водорода с электронами — процесс, сопровождающийся выделением тепла (q). Это тепло задерживает охлаждение газа до температуры внешней среды, и объем будет продолжать подниматься. В опускающемся объеме, наоборот, начнется ионизация водорода, требующая затраты тепла, объем не сможет разогреться до «наружной» температуры и будет продолжать опускаться. Унзольд, как за четверть века до него К. Шварцшильд, связал конвекцию в подповерхностных слоях Солнца с хорошо известным явлением г р а н у л я ц и и. Но Карл Шварцшильд не мог еще учесть и оценить значение ионизации водорода.

В 1935 г. другой немецкий астрофизик, Л. Бирман, применив к анализу конвекции в звездных недрах метод,

развитый гидродинамиком Прандтлем, показал, что глубина конвективной зоны может быть гораздо больше, чем принимал Унзольд, и измеряться десятками тысяч километров. Тремя годами ранее Бирман установил, что в звезде с сильной концентрацией источников энергии к центру должно



Рис. 4. Модель звезды по Каулингу.

образоваться конвективное ядро, потому что один лучистый перенос не будет успевать «откачивать» энергию, вырабатываемую в этом ядре чересчур мощными источниками. На основе идей Бирмана англичанин Т. Каулинг разработал ставшую хорошо известной модель звезды с конвективным ядром и оболочкой, находящейся в лучистом равновесии (рис. 4).

Источники звездной энергии были все еще неизвестны, но их мощность и распределение по глубине использовались астрофизиками для расчета моделей звезд.

Таково было положение на этом участке общего фронта наступления на проблему. Обратимся теперь к другому участку — к проблеме звездной эволюции. И снова отступим по шкале времени на полвека назад. Отступим назад — чтобы двинуться вперед.

Жизненный путь звезды

К проблеме: как протекает жизненный путь звезды — можно было подойти с нескольких позиций.

Можно было подвергнуть тщательному анализу диаграмму Герцшпрунга — Рассела и сделать из него какие-то космогонические выводы.

Можно было, задавшись каким-то определенным механизмом пополнения звездной энергии и зная, как зависит интенсивность излучения от массы, радиуса и температуры звезды, попытаться теоретически рассчитать ход эволюции звезды.

Можно было взять за основу условия лучистого и конвективного равновесия и построить семейство устойчивых моделей звезд, а затем сравнить их с данными наблюдений.

Астрономы и физики шли по всем трем направлениям, неуклонно приближаясь к решению проблемы.

Первые попытки проследить жизненный путь звезды были весьма робкими. О некоторых из них мы уже рассказывали. Применение законов Лейна к гипотезе гравитационного сжатия Гельмгольца — Кельвина уже принесло новый результат: сжимающаяся звезда должна разогреваться (температура изменяется обратно пропорционально радиусу!), пока увеличение плотности не замедлит сжатие настолько, что расход энергии превысит приход. Тогда звезда начнет остывать. Эволюционный путь звезды, таким образом, уже сто лет назад представлялся состоящим из двух ветвей: восходящей и нисходящей. А. Риттер в 1883 г. прямо указывал на то, что красные гиганты находятся на восходящей, а красные карлики — на нисходящей ветви эволюции.

Оригинальную гипотезу происхождения звезд путем конденсации из метеорной материи предложил Норман Локьер в своем выступлении 17 ноября 1887 г. перед Лондонским королевским обществом. Развивая свою гипотезу дальше, Локьер опирался не только на теоретические выводы Лейна и Риттера, но и на результаты исследований спектров звезд.

Схема эволюции звезд по Локиеру выглядит так (рис. 5). В начале жизненного пути находятся красные гиганты типа Антареса (класс М), затем звезда проходит стадии оранжевого гиганта, как Альдебаран (К5), желтого гиганта, как Полярная (F8), белого гиганта, как Денеб (А2) и Ригель (В8). На вершине эволюции находятся самые горячие голубые звезды: γ Парусов и ζ Кормы (класс О). На нисходящей ветви последовательно располагаются бело-голубые звезды, как Ахернар (В5), белые, как Сириус (А0), бело-желтые, как Прокцион (F5), желтые, как Солнце (G) и Арктур (K), наконец, красные карлики, как 19 Рыб (N). Дальше звезда угасает и становится темной.

Но Локиер, разрабатывая свою схему эволюции звезд, исходил из убеждения, что известные нам химические элементы состоят из еще более простых элементарных частиц, которые он называл «протоэлементами». Эти частицы не были едины для всех элементов, как известные ныне протон, нейтрон и электрон, а носили более «индивидуализированный» характер. Так, водород, по Локиеру, при высокой температуре распадается на «протоводород», который и дает усиленные линии в спектре — с-линии, по класси-

фикации мисс Мори. Железо превращается в «протожелезо» и дает линии искрового спектра, и т. д.

В действительности «протоводород» оказался ионом гелия, другие усиленные линии оказались принадлежавшими ионам металлов. Но идеи Локиера, окончательно сформулированные им в 1900 г., спустя 13 лет в несколько ином виде (без метеорной гипотезы и «протоэлементов») были развиты Генри Норрисом Ресселом в его гипотезе эволюции звезд, основанной на известной нам диаграмме.

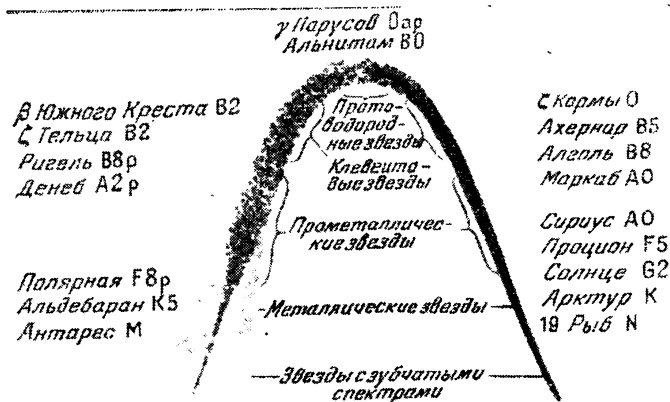


Рис. 5. Схема эволюции звезд по Локиеру.

13 июня 1913 г. он доложил свою гипотезу на собрании Королевского астрономического общества в Лондоне. Спустя полгода, 30 декабря 1913 г., он повторил свой доклад на съезде Американского астрономического общества.

«Если мы расположим звезды, которые мы изучаем, в порядке возрастания плотности, то мы должны начать с гигантских звезд класса M и затем проследить ряд гигантов в порядке, обратном тому, в каком обычно располагаются спектры, до звезд классов A и B и далее при все еще возрастающей, хотя уже и медленнее, плотности перейти вниз на последовательность карликов в обычном порядке изменения спектральных классов, встретив на пути Солнце, к тем красным звездам (снова в класс M), которые являются самыми слабыми из известных в настоящее время звезд», — так описывал Рессел свою гипотезу.

Первая гипотеза звездной эволюции Рассела получила всеобщее признание. Но ненадолго. Спустя 12 лет сам автор гипотезы приступил к ее пересмотру. И для этого у него было немало оснований.

В результате работ Дж. Джинса, А. Эддингтона и самого Г. Н. Рассела стало ясно, что основным источником энергии в звездах является не гравитационное сжатие, а какой-то иной механизм, сопровождаемый переходом части вещества в поле излучения.

В 1924 г. А. Эддингтон установил очень важное обстоятельство, состоявшее в том, что ионизованный газ в недрах звезды обладает практически неограниченной сжимаемостью. Таким образом, звездное вещество при любых плотностях ведет себя как идеальный газ.

Кроме того, почти для всех элементов в недрах звезд, за исключением водорода и гелия, средний молекулярный вес $\bar{\mu}$ оказался близким к двум. Действительно, атомы из-за сильной ионизации разделяются там на ядро и электроны. Поэтому для водорода мы получим $\bar{\mu} = 1/2$ (единичная масса приходится на две частицы: протон и электрон), для гелия $\mu = 4/3$ (4 единицы массы делятся между ядром и двумя электронами), но для натрия $\mu = 23/12 \approx 2$, для железа $\bar{\mu} = 56/27 \approx 2$ и т. д. Правда, до работы Рассела 1929 г. еще не было известно, что Солнце и большинство звезд состоят в основном из водорода, и Эддингтон ошибочно полагал, что в среднем для всего звездного газа $\mu = 2$.

Большое значение имела также разработка в эти годы теории лучистого равновесия (в основном трудами А. Эддингтона) и вывод Г. Крамерсом формулы для коэффициента поглощения излучения звездной материей, о чем мы уже рассказывали.

В свете этих открытий охлаждение красных карликов следовало объяснить уже не замедлением сжатия из-за уплотнения вещества в их недрах, а ростом непрозрачности звездной материи по мере этого уплотнения.

Перерабатывая свою гипотезу, Рассел исходил из следующих соображений. Главная последовательность на Γ — P -диаграмме — не узкая линия, а довольно широкая полоса. Между тем, если бы все звезды имели одинаковый химический состав, выход энергии на единицу массы определялся бы только температурой и плотностью звезды. Диаграмму «спектр—светимость» можно преобразовать в другую диаграмму: «температура—плотность», и тогда все звезды главной последовательности легли бы на тонкую

линию. Раз этого нет, значит, выход энергии зависит от состава вещества, очевидно, того самого вещества, за счет которого эта энергия вырабатывается. Рассел назвал эту «активную» материю «материей карликов» (поскольку значительную часть звезд главной последовательности составляли карлики).

Но на Г—Р-диаграмме была еще ветвь гигантов. Кроме того, в левом нижнем углу диаграммы находилось несколько слабых белых звезд (спутник Сириуса, 40 Эридапа В, спутник Прокциона), получивших название б е л ы х к а р л и к о в и представлявших некоторое время загадку. При крайне малых размерах они имели массу порядка солнечной, а значит, чудовищную плотность: в десятки и сотни тысяч раз больше плотности воды. Сначала это казалось астрономам необъяснимым, но после открытия Эддингтоном факта неограниченной сжимаемости звездного газа белые карлики перестали быть загадкой.

Рассел предположил, что ветвь гигантов как бы через перекидной мост соединяется на Г—Р-диаграмме с областью белых карликов и так как звезды и здесь не ложатся на узкую линию, то, значит, все дело в том, что и у них выход энергии зависит от содержания некоей «активной» материи, но иного типа, чем у звезд главной последовательности, — «материи гигантов».

Теперь оставалось задаться предположением о начальной массе звезды и о том, испытывает ли она малые или большие потери массы в ходе эволюции. Весь путь эволюции звезды определяется теперь тремя различными механизмами пополнения энергии:

- 1) гравитационное сжатие,
- 2) потребление (т. е. переход в излучение) материи карликов,
- 3) потребление материи гигантов.

Несмотря на то, что нам эти термины кажутся наивными, рассмотрим ход рассуждений Рассела, ибо в п р и н ц и п е именно такими рассуждениями (подкрепленными, разумеется, расчетами) определяют эволюционный путь звезды и в наше время.

Предположим сперва, что звезда в ходе эволюции теряет лишь малую долю своей массы. На схеме Г—Р-диаграммы (рис. 6) линии AA , $A'A'$, $A''A''$ соответствуют устойчивым состояниям звезд с постепенно убывающим запасом материи карликов, а линии BB , $B'B'$ и $B''B''$ — устойчивым состояниям, соответствующим уменьшению запаса материи ги-

гантов. Массивная звезда M_1 , сжимаясь, нагревается за счет гравитационного сжатия и довольно быстро доходит до состояния G , где начинается потребление материи гигантов. Эволюция звезды замедляется, и она постепенно, расходуя материю гигантов, переходит через G_1 в G_2 . Здесь запас материи гигантов оказывается исчерпанным, и звезда начинает быстро сжиматься, превращаясь из красного

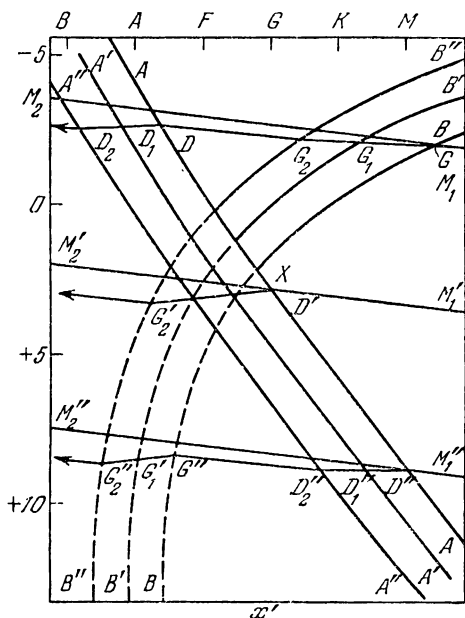


Рис. 6. Схема эволюции звезд по Расселу.

гиганта в белый — в точке D . Тут звезда снова задерживается, начиная потреблять материю карликов, и проходит через точки D_1, D_2 . Потеря массы невелика, и звезда лишь немного сместится на диаграмме вниз от линии постоянной массы $M_1 M_2$.

У звезды малой массы (красного карлика) M'_1 путь иной. Сжатие приводит ее в точку D'' , где складываются благоприятные условия для потребления материи карликов. Пройдя путь $D'' D'_1 D'_2$, звезда сжимается до положения G'' , т. е. до стадии белого карлика. Здесь она замедляет свой путь, потребляя материю гигантов и перемещаясь к точкам G'_1, G'_2 .

Наконец, звезда средней массы M_1' после первой фазы сжатия достигает точки D' , спустя некоторое время она начинает потреблять материю карликов и материи гигантов одновременно и переходит в точку G_2' , после чего наступает вторая фаза сжатия — до такой стадии уплотнения, когда даже ионизация не может помешать прекращению сжатия и остыванию звезды, уже лишенной каких-либо источников энергии. Та же судьба ожидает звезды, прошедшие точки D_2 и G_2'' .

Чтобы все протекало именно таким образом, Рассел должен был приписать материи карликов и материи гигантов особые свойства. Мы помним, что по законам Лейна при сжатии звезды температура $T \sim r^{-1}$, а давление $p \sim r^{-4}$, где r — радиус звезды. Но тогда отношение $T^4/p = \text{const}$ и зависит только от массы звезды. Из расположения «полос активности» материи гигантов и материи карликов на Г—Р-диаграмме следовало, что первая интенсивно выделяет энергию при низких температурах, если T^4/p велико, и при высоких температурах, когда это отношение мало (т. е. велико давление). Материя карликов, напротив, выделяет энергию при данной температуре тем интенсивнее, чем больше T^4/p , т. е. при низких давлениях и плотностях.

Если звезда в ходе эволюции расходует значительную часть «активной» материи, убыль массы становится заметной и эволюционные треки на диаграмме становятся более сложными (рис. 7). Попадая в «активную» полосу, звезда как бы увлекается вдоль этой полосы, и ее трек загибается вниз, что отвечает потере массы.

Например, массивная звезда M_1 , дойдя, как и на предыдущей схеме, после сжатия до точки G , будет пересекать ветвь гигантов по диагонали, а не горизонтально: по линии GG_1D . Израсходовав часть материи гигантов, она начинает дальше расходовать материю карликов, перемещаясь вдоль главной последовательности через DD_1D_2 . Исчерпав материю карликов, звезда сжимается и в G_2 начинает истреблять остатки материи гигантов, уменьшаясь в массе и в объеме. Таким образом, красный гигант M_1 проходит стадии желтого и белого гигантов, а затем желтого, красного и, наконец, белого карлика.

Путь звезды малой массы изображается треком $M'D'D_1D_2G'$, путь сверхгиганта — прерывистым треком, начинающимся в B' .

Несмотря на всю сложность второй гипотезы Рассела и на наличие в ней множества белых пятен (неясна природа

обоих видов «активной» материи, способ генерации энергии, причина именно такой зависимости выхода энергии от $T^3 \rho$ и T), оба ее варианта дают два основных истолкования Г—Р-диаграммы:

1) Если звезда почти не теряет массы в ходе эволюции, то густо населенные области на диаграмме соответствуют наиболее устойчивым и длительно существующим состояниям звезд.

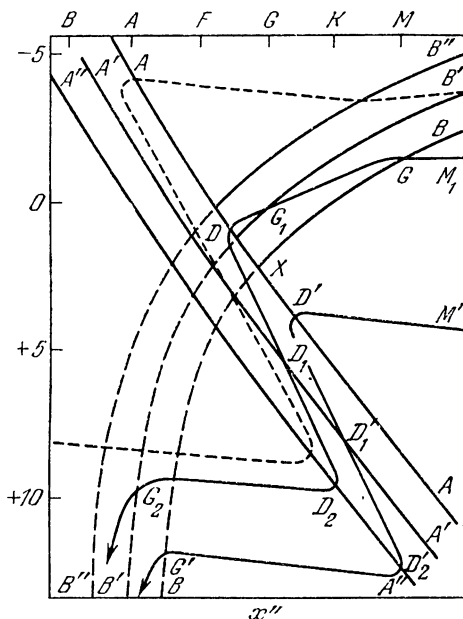


Рис. 7. Эволюция звезд по Расселу с потерей массы.

2) Если звезда в ходе эволюции теряет массу, основные ветви диаграммы отражают последовательное перемещение звезд вдоль них.

К вопросу о том, перемещается ли звезда в течение своего существования вдоль главной последовательности или поперек нее, мы скоро вернемся.

Джемс Джинс подверг вторую гипотезу Рассела резкой критике. Согласно этой гипотезе, переработка «активной» материи в излучение начинается после достижения веществом звезды некоторой критической температуры (по оценке

Рессела, 32 миллиона градусов). Но, указывал Джинс, достигнув этой температуры, звезда на этом не остановится, а будет разогреваться дальше (включится новый мощный источник энергии!). Зона сверхкритической температуры будет расширяться, захватывая все новые и новые порции «активной» материи. Поэтому интенсивность излучения такой звезды будет усиливаться спонтанно. Джинс сравнивал подобную звезду с бочонком пороха с искрой внутри него.

Рессел и Эддингтон предприняли немало усилий для того, чтобы устранить противоречия этой гипотезы. Это им удалось ценой введения ряда совершенно искусственных предположений. Груз этих предположений не хуже, чем устранимые ими противоречия, тянул гипотезу на дно.

Тогда Джинс предпринял общее математическое исследование вопроса о звездной устойчивости и пришел к простому выводу: пустые области на Γ — R -диаграмме соответствуют неустойчивым состояниям звезды. Это был весьма логичный и, в общем, правильный вывод. Но существенно продвинулся дальше Джинсу не удалось. Он считал, что переработка «активной» материи звезды не может зависеть от температуры, как предполагается в гипотезе Рессела, поскольку это противоречило бы «основным положениям физики... и всем нашим сведениям об атомных явлениях». В качестве примера Джинс приводил радиоактивный распад, скорость которого не зависит от температуры. Основная идея Джинса состояла в том, что: а) процесс переработки звездного вещества происходит самопроизвольно и не зависит от температуры звезды; б) центральные области звезды не находятся в чисто газообразном состоянии, поскольку атомы, ядра и электроны сжаты здесь так тесно, что не могут двигаться свободно, и вещество в центральной области обладает свойствами жидкости.

Это предположение Джинс пытался подкрепить соображениями об образовании тесных двойных звезд путем деления, которое возможно лишь для жидких, но не газообразных масс. Однако ни его гипотеза об образовании двойных звезд, ни гипотеза о квазизжидком состоянии центральных частей звезды не получили подтверждения. Не было ни наблюдательных фактов, ни теоретических соображений, которые говорили бы в пользу таких предположений.

Уже в наши дни, в октябре 1968 г., известный английский астрофизик Фред Хойл, выступая с лекцией в Коро-

левском астрономическом обществе, так охарактеризовал спор между Джинсом и Эддингтоном:

«Полемика между Эддингтоном и Джинсом, которая удивляла и развлекала астрономов в течение многих лет, недавно приобрела для меня новый смысл. Для моего поколения Эддингтон был человеком, который говорил все правильно, а Джинс — человеком, который говорил все неправильно». И дальше Хойл разъяснял, что расхождения между Ресселом и Эддингтоном, с одной стороны, и Джинсом, с другой, не были случайными, а имели глубокие корни, заключавшиеся в различии принципиального подхода к решению стоявших перед ними проблем.

«Люди, подобные Эддингтону и Ресселу, — продолжал в своей лекции Хойл, — позволявшие себе руководствоваться наблюдениями, пришли к предвидению многих результатов, достигнутых позднее с использованием ядерной физики. При этом они осмеивались физиками своего времени. По иронии судьбы главная причина того, что британские физики не могли считать астрономии серьезной частью физики, заключалась в насмешках, которым подвергли Эддингтона ученые Лаборатории им. Кавендиша (той самой, где работали известные физики Дж. Дж. Томсон и Эрнест Резерфорд. — В. Б.), в особенности за его предположение, что энергия звезд доставляет превращение водорода в гелий. Они говорили ему, что звезды недостаточно горячи для этого, и он с некоторым раздражением советовал им пойти поискать местечко погорячее.

Джинс в то же время сам был физик. Среди специалистов по теоретической физике он был наиболее опытен в проблемах звездной эволюции. Он ограничил себя общепринятой физикой и пытался заставить астрономию уложиться в картину, даваемую наблюдениями, на том основании, что физика лучше известна, чем астрономия». Однако и Джинс, отмечает Хойл, иногда «оставлял свою общепринятую физику и позволял себе руководствоваться фактами» и тогда приходил подчас к замечательным умозаключениям. Некоторые из них не потеряли значения и поныне.

Безусловно, в астрономии, как и в физике, факты имеют первостепенное значение. Теоретик, оторвавшийся от фактов, неизбежно потерпит поражение при штурме сложной проблемы. Но факты надо уметь отбирать, анализировать и обобщать. Эддингтон умел это делать и не боялся того, что порой анализ фактов приводил его к весьма смелым и даже революционным представлениям.

В те годы еще один вопрос стал предметом жарких дискуссий между астрофизиками, и в первую очередь между Джинсом и Эддингтоном. Этот вопрос не был изолированным — он составлял неотъемлемую часть общей проблемы. Речь шла о продолжительности существования звезд: измеряется ли она миллиардами (10^9) или триллионами (10^{12}) лет?

Длинная или короткая шкала?

За первую четверть нашего века взгляды ученых на возраст Земли и Солнца претерпели коренные изменения.

В мае 1904 г. еще молодой Эрнест Резерфорд выступил в Лондонском королевском институте с лекцией о возрасте

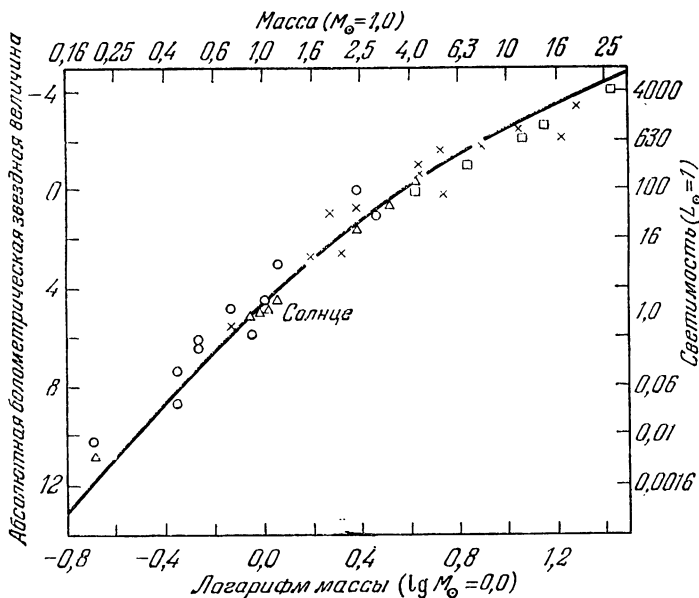


Рис. 8. Зависимость «масса — светимость».

Земли, в которой нанес удар господствовавшим полвека представлениям Гельмгольца — Кельвина о том, что возраст Земли не превышает 100 миллионов лет. (По Гельмгольцу, как мы помним, выходило 20 миллионов лет, но Кельвин сумел, введя некоторые предположения о строении Солнца, «дотянуть» этот срок до 100 миллионов лет.) Против

авторитета лорда Кельвина (лично присутствовавшего на лекции) Резерфорд выставил кусочек урановой смолки, имевший, по «радиоактивным часам», возраст 700 миллионов лет. Вскоре были найдены и более древние горные породы. Оценка возраста Земли поднялась до 2 миллиардов лет.

Было ясно, что и Солнце не моложе. Более того, из палеонтологических данных следовало, что за последний миллиард лет климат Земли не претерпел существенных изменений, значит, и интенсивность солнечного излучения почти не менялась. Два миллиарда лет можно было уверенно принять за н и ж н и й п р е д е л возраста Солнца.

Но нижний предел --- это еще не самый возраст. Астрофизики с разных сторон попытались определить возрасты Солнца и звезд. Мы уже говорили, что Джинс, исходя из скорости потери массы звездами за счет излучения, предпринял в 1925 г. попытку оценить возрасты Солнца и звезд. При этом он опирался на очень важную зависимость «масса—светимость», выведенную за год до этого Эддингтоном из наблюдательных данных (рис. 8). Из диаграммы, построенной Эддингтоном, следовало, что звезда с массой, вдвое большей солнечной, должна излучать примерно в 8 раз сильнее Солнца. Джинс попробовал проследить изменение массы и интенсивности излучения Солнца в прошлом. Получилась такая таблица:

| ΔT (лет) | M/M_{\odot} | ΔT (лет) | M/M_{\odot} |
|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| $2 \cdot 10^9$ | 1,00013 | $7,1 \cdot 10^{12}$ | 4 |
| 10^{12} | 1,07 | $7,4 \cdot 10^{12}$ | 8 |
| $2 \cdot 10^{12}$ | 1,16 | $7,5 \cdot 10^{12}$ | 20 |
| $5,7 \cdot 10^{12}$ | 2 | $7,6 \cdot 10^{12}$ | 100 |

Здесь ΔT --- время, протекшее до настоящей эпохи, M/M_{\odot} --- отношение массы Солнца к современной. Легко понять, как вычислена эта таблица. Задавая скорость потери массы путем излучения в данный момент, можно рассчитать, какой была масса Солнца, скажем, два миллиарда лет назад. Так получается первое значение массы. Затем скорость потери массы изменяется (варьируется) с учетом нового значения массы, и получается масса Солнца 4 миллиарда лет назад. Операция повторяется много раз, пока не получается вся таблица. Описанный процесс

называется численным интегрированием. Три первых значения M/M_{\odot} Джинс получал по заданным ΔT , а дальше поступал наоборот, т. е. задавал M/M_{\odot} и находил ΔT .

Но к данной задаче можно применить и аналитическое интегрирование, позволявшее для любого значения ΔT сразу, без расчетов для предыдущих значений, получить M/M_{\odot} и наоборот.

Звезды с большими массами так интенсивно излучают, что независимо от природы источников энергии должны быстро терять массу, что иллюстрирует правая половина таблицы. Звезд с массами больше 100 солнечных не существует, поэтому $7,6 \cdot 10^{12}$ лет — в е р х н и й п р е д е л возраста Солнца.

Итак, возраст Солнца заключен в пределах между 2 миллиардами и 7,6 триллиона лет. Но чему он равен в действительности? И каковы возрасты других звезд, занимающих различные места на Г—Р-диаграмме?

Джинс считал, что возраст Солнца близок к верхнему пределу и что возрасты звезд вообще измеряются 5—10 триллионами лет. Это представление получило название д л и н н о й ш к а л ы возраста звезд.

Напротив, Рессел и Эддингтон считали, что возраст Солнца ближе к нижнему пределу, а возрасты звезд измеряются миллиардами лет. Такая концепция получила название к о р о т к о й ш к а л ы возраста звезд.

Дискуссия о возрасте звезд продолжалась около 15 лет — до самого открытия источников звездной энергии в 1939 г.

Разумеется, Джинс искал независимых подтверждений своей точки зрения. И он обратился для этого к другой области астрономии — к звездной динамике. Незадолго до того, в 1922 г., астроном обсерватории Маунт Вилсон Ф. Сирс произвел статистическую обработку наблюдательных данных о скоростях и массах звезд различных спектральных классов. Получилась очень интересная картина: с переходом от ранних классов (т. е. от белых гигантов) к поздним (т. е. к красным карликам, так как красные гиганты составляли ничтожное меньшинство) средняя масса, естественно, убывала, но средняя скорость, наоборот, в о з р а с т а л а. Выяснилось, что менее массивные звезды движутся гораздо быстрее более массивных, и притом настолько, что средняя кинетическая энергия движения звезд каждого класса ($mv^2/2$) оказывалась о д и н а к о в о й. Это означало, что в системе звезд установилось равномерное распределение энергий.

А теперь представим себе, что звезды — это молекулы некоего воображаемого газа, и рассчитаем по законам молекулярной физики время, необходимое для установления такого равновесия. Правда, аналогия с молекулами неполная, поскольку молекулы меняют свои скорости только в результате столкновений и обмена энергиями, тогда как в системе звезд столкновения практически вовсе не происходят, зато главным фактором являются гравитационные взаимодействия, осуществляемые на расстоянии. Но это можно было учесть в математической постановке задачи, и Джинс это сделал. Он получил тот же результат: время, необходимое для установления равновесия в системе звезд, измеряется 5—10 триллионами лет.

Джинс применил третий метод оценки возраста звезд. Он изучил орбиты двойных звезд, точнее, их распределение по эксцентриситетам. В результате гравитационных воздействий проходящих мимо одиночных звезд (составляющих большинство в Галактике) распределение орбит двойных звезд по эксцентриситетам должно постепенно приближаться к равновесному. На этот раз Джинс использовал данные об орбитах 119 спектрально-двойных и 68 визуально-двойных звезд, собранные Р. Эйтקיном на Ликской обсерватории. Изучение этих данных показало, что тесные пары спектрально-двойных звезд далеки от равновесного распределения эксцентриситетов: 65% пар имеют эксцентриситеты меньше 0,2, т. е. орбиты у них близки к круговым. У широких пар (визуально-двойных) наибольшее количество звезд обладает средними эксцентриситетами, от 0,4 до 0,6, а почти круговые и сильно вытянутые орбиты составляют меньшинство. Таким образом, ни та, ни другая группа звезд не достигли равновесного распределения, но широкие пары ближе к нему, чем тесные пары. Это приводило к подтверждению оценки возраста звезд, сделанной Джинсом, т. е. длинной шкалы времени.

Постоянный противник Джинса Артур Эддингтон и в этом вопросе встал на противоположную точку зрения. Он тоже составил таблицу возрастов звезд в зависимости от их массы, но продолжил ее в сторону звезд малых масс — до 0,2 массы Солнца. И вот получилось, что у этих звезд-карликов возрасты должны доходить до 10^{15} лет, если считать, что звезда существенно изменяет свою массу в ходе эволюции. Но тогда количество звезд разных масс должно быть пропорционально их возрастам, и значит, число красных карликов должно в 1000 раз превосходить количество

звезд типа Солнца. Наблюдения не подтверждали этого, хотя число карликов действительно возрастало с уменьшением их массы.

Но это означало, что звезда в течение своего существования расходует лишь небольшую долю своей массы и вовсе не обязана проходить весь диапазон масс на Г—Р-диаграмме. Если допустить, что Солнце расходует лишь 1% своей массы, то срок его жизни получался гораздо меньше: около 10^{11} лет.

Эддингтон сделал еще один шаг в своих рассуждениях. Если механизмом генерации звездной энергии является превращение водорода в гелий, то не может же Солнце целиком состоять из водорода. Поскольку водород составляет лишь некоторую долю солнечной массы (допустим, 50%), срок его жизни сократится уже до $5 \cdot 10^{10}$ лет. Но это еще не возраст Солнца, а срок всей его жизни: и прошлой, и будущей. Возраст же Солнца, очевидно, еще меньше, порядка 10^{10} лет.

Как же обстояло дело со звездно-динамическими аргументами, приводившимися Джинсом? Как отметил в 1932 г. директор Пулковской обсерватории профессор Б. П. Герасимович, трезвый анализ показал, что результаты Джинса иллюзорны. Равенство средних кинетических энергий звезд разной массы — лишь иллюстрация статистической «селекции» исходных данных. В самом деле, для определения линейной скорости звезды нужно было знать расстояние до нее, а для этого — определить ее параллакс. Между тем программы определения тригонометрических параллаксов составлялись в то время несколько особым образом. В них включались главным образом те звезды, которые имели большие собственные движения, так как этот факт считался (совершенно правильно) одним из признаков близости звезды к нам, а значит, и практической возможности определить ее параллакс. Таким образом, отбирались близкие к нам звезды, имевшие значительные собственные движения, т. е. большие скорости в пространстве. Но среди близких звезд большинство — карлики, т. е. звезды с малыми массами. Выходило, что из этих звезд мы искусственно отбираем те, которые движутся с большими скоростями, чем и достигается «равенство» кинетических энергий звезд различных масс.

Примерно та же судьба постигла другой аргумент Джинса в пользу длинной шкалы: распределение эксцентриситетов орбит двойных звезд. В 1937 г. молодой совет-

ский ученый В. А. Амбарцумян, применив к двойным системам методы небесной механики, используемые в теории движения Луны, показал, что, вопреки мнению Джинса, в двойных системах (и даже среди широких пар) нет состояния равнораспределения по энергии и возраст всей совокупности двойных звезд не превышает 10^{10} лет. Еще через два года вывод Амбарцумяна подтвердил московский астроном П. П. Паренаго, нашедший, что статистического равновесия среди двойных звезд не существует.

Но еще задолго до опубликования этих работ советских ученых у сторонников короткой шкалы появился еще один аргумент, который они считали самым важным, почти убийственным для длинной шкалы возраста звезд.

В 1929 г. американский астроном Э. Хаббл на основании наблюдений «красного смещения» линий в спектрах далеких галактик установил важный факт: галактики разбегаются от нас тем быстрее, чем дальше они находятся.

Вся система галактик (Метагалактика) расширяется, разбухает, как мыльный пузырь. Возникла теория «расширяющейся Вселенной», о которой подробно будет рассказано в главе V. Согласно этой теории, разлет галактик начался в некий единый момент времени, как считали тогда, около двух миллиардов лет назад. Именно тогда, по мнению бельгийского астронома и аббата Ж. Леметра, бог сотворил мир.

Несмотря на полную идеологическую неприемлемость этой точки зрения, теория «расширяющейся Вселенной» нанесла сильный удар по концепции длинной шкалы возраста звезд. Действительно, не могут же отдельные звезды быть старше самой Вселенной.

И вот 8 марта 1935 г. на очередном собрании Лондонского королевского астрономического общества в дискуссии о возрасте Вселенной вновь скрестили шпаги старые противники: Джеймс Джинс и Артур Эддингтон. Вместе с ними участие в дискуссии принял и один из авторов теории расширяющейся Вселенной Эдуард Милн.

Первым выступил Джинс. Спокойно изложил он уже известные нам аргументы в пользу длинной шкалы (критические статьи В. А. Амбарцумяна и П. П. Паренаго тогда еще не были опубликованы) и добавил к ним еще два: наличие движущихся скоплений, состоящих из одних звезд-гигантов (карлики «выбиты» из этих скоплений гравитационным воздействием окружающих звезд, на что понадобилось длительное время), и большой срок, необхо-

димый межзвездному газу, чтобы собраться в наблюдаемые нами газовые туманности.

Джинс не отрицал и достоинств короткой шкалы, но все же проголосовал за длинную.

Эддингтон привел два серьезных аргумента в пользу короткой шкалы: уже известный нам факт разбегания галактик и невозможность сохранить устойчивость нашей (и любой другой) Галактики за время, сильно превосходящее 10^9 лет. Он назвал совершенно фантастическим предположение голландского астронома де Ситтера о том, что звезды, быть может, старше самих галактик, что система галактик образовалась из уже готовых звезд.

Милн посвятил свое выступление главным образом обоснованию теории образования материальной Вселенной в некий момент, который он назвал «натуральным началом счета времени». Затем он попытался связать расширение Вселенной с движением частиц космических лучей.

Председатель поблагодарил всех трех участников дискуссии, и собравшиеся чинно разошлись по домам. Проблема осталась нерешенной. Да ее и невозможно было решить, не зная, какими источниками энергии располагает звезда.

Казалось, получался замкнутый круг. Но круг этот вскоре был разорван. Источники звездной энергии были наконец найдены.

Источник найден!

Долг и труден был путь астрофизиков к открытию источников звездной энергии. Мы проследили все его этапы. Но самое удивительное — это то, что ученые не раз говорили о тех явлениях, которые, как мы теперь хорошо знаем, служат источниками энергии в звездах, и... проходили мимо.

В 1925 г. А. Эддингтон отстаивал возможность образования гелия из водорода в недрах звезд. Он спорил с физиками, считавшими звездные недра недостаточно горячими для ядерных реакций: «Гелий, который мы имеем, должен был где-то и когда-то образоваться. Мы не спорим с критиком, который говорит, что звезды недостаточно горячи для этого процесса, мы говорим ему: найдите более горячее место!»

Эддингтон интуитивно понимал, что образование гелия из водорода может протекать в звездах и давать им энергию.

Но он не мог доказать это. Не было еще ни теоретических, ни экспериментальных данных о скоростях ядерных реакций при разных температурах.

В 1929 г. американские физики Р. Аткинсон и Ф. Хоутермэнс доказали, что при температурах порядка 20 миллионов градусов протоны могут проникать в ядра легких элементов (от лития до азота). Прежде это считалось невозможным из-за потенциального барьера. Ядро и протон (или два ядра) оба имеют положительные заряды и по закону Кулона должны отталкиваться друг от друга. Кинетическая энергия протонов при температурах, царящих в недрах звезд, недостаточна для преодоления этого кулоновского барьера. Именно поэтому физики высмеивали идею Эддингтона о ядерных реакциях.

Но так обстоит дело лишь с точки зрения классической физики. Развитие в середине 20-х годов новой, квантовой физики позволило открыть туннельный эффект: некоторую вероятность для налетающей частицы преодолеть потенциальный барьер даже с меньшей энергией, чем требуется, чтобы его «перепрыгнуть». Такая частица проходила как бы не над барьером, а под ним, сквозь своеобразный «туннель».

Аткинсон и Хоутермэнс оценили высоту потенциальных барьеров различных ядер и подсчитали вероятность освобождения энергии. Она оказалась пропорциональной двадцатой степени температуры! При звездных температурах выход энергии был достаточен для покрытия расходов звезды на излучение.

Но работа Аткинсона и Хоутермэнса не имела экспериментальной основы. Кроме того, они не могли указать, какие именно ядерные реакции происходят в звездах и дают энергию.

Тридцатые годы ознаменовались рядом крупных успехов экспериментаторов. В 1932 г. были открыты позитрон и нейтрон. В 1933 г. начали работать ускорители заряженных частиц, позволявшие осуществлять экспериментально ядерные реакции с легкими ядрами и протонами. Были открыты изотопы тяжелого водорода (дейтерий и тритий) и легкого гелия (He^3).

В начале 1938 г. Георгий Гамов и Эдвард Теллер пересмотрели теорию Аткинсона и Хоутермэнса с учетом экспериментальных данных и подсчитали скорости ядерных реакций, проходящих при высоких температурах (их стали вскоре называть термоядерными реакциями).

В апреле 1938 г. Георгий Гамов собрал в Вашингтоне небольшую конференцию, на которой астрофизики рассказали физикам все, что было тогда известно о внутреннем строении звезд. Астрофизики не знали источника звездной энергии, но предполагали, что он сосредоточен близ центра звезды.

Среди участников конференции были два немецких физика: Курт Вейцеккер, который еще в 1937 г. высказал предположение о термоядерных реакциях, которые могут происходить в недрах звезд, и Ганс Бете. Обмен мнений на Вашингтонской конференции побудил их рассмотреть подробнее вопрос о термоядерных реакциях в звездах.

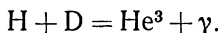
Вейцеккер первый опубликовал в 1938 г. работу, в которой указывал на две возможные реакции, могущие служить источником энергии звезд: протон-протонную реакцию и углеродно-азотный цикл. Но Вейцеккер не исследовал ни скорость реакций, ни их зависимость от температуры.

В 1939 г. вышло обстоятельное исследование Ганса Бете, в котором эти задачи были решены. Вот как подошел к их решению Бете. Из формул квантовой механики следовало, что вероятность ядерной реакции (любой), называемая обычно сечением реакции (так как она имеет размерность площади), тем больше, чем меньше заряды сталкивающихся частиц. Отсюда вытекало, что хотя бы одной из двух взаимодействующих частиц должен быть протон, ядро атома водорода, имеющее минимальный заряд.

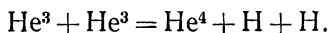
Бете начал перебирать все реакции с участием протона. Самая простая из них — это столкновение протона с другим протоном:



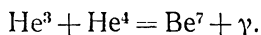
В ходе этой реакции образуются: дейтерон (D, ядро дейтерия), позитрон (e^+) и нейтрино (ν). Затем в образовавшийся дейтерон может попасть третий протон:



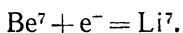
При этом образуется ядро легкого гелия (He^3) и γ -квант — первая порция энергии излучения. Если температура газа меньше 15 миллионов градусов, ядро He^3 может вступить в реакцию с другим точно таким же ядром, причем получается ядро обычного гелия He^4 и два протона: *



При больших температурах более вероятно столкновение ядер легкого и обычного гелия с образованием ядра бериллия и выходом второго γ -кванта:



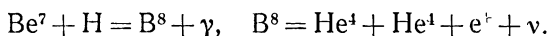
Неустойчивый изотоп бериллия Be^7 захватывает электрон и превращается в изотоп лития Li^7 :



Литий-7 — удобная мишень для протона, при ударе которого он распадается на два ядра He^4 :



Наконец, при температурах свыше 20 миллионов градусов Be^7 с большей вероятностью подвергнется удару протона, чем захватит электрон. Он образует ядро атома бора B^8 , которое также распадется на два ядра He^4 с испусканием позитрона и нейтрино:

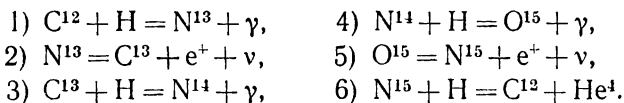


Таковы различные варианты протон-протонной реакции и быстро следующих за ней дополнительных реакций. Чтобы выяснить возможности этих реакций и их относительную вероятность, Бете пришлось проделать громадную работу. Для вычисления вероятности реакций он использовал теорию Гамова и Теллера. Эффективные сечения он вычислял, опираясь на опытные данные, а там, где их не было, пользовался формулами, дававшими наилучшее согласие с наблюдениями. После этого надо было установить, насколько устойчивы некоторые изотопы, неизвестные пока в природе и в лаборатории, но могущие возникнуть в ходе тех или иных ядерных реакций в звездах. Сперва Бете перебрал 11 изотопов легких элементов — от водорода до углерода, потом обратился к более тяжелым. Затем он рассчитал скорости реакций и их зависимость от температуры.

Во всех рассмотренных ранее реакциях конечным продуктом оказывались ядра гелия (He^4). А не могут ли таким же путем образовываться более тяжелые ядра? Бете рассмотрел 6—7 способов образования тяжелых ядер до углерода включительно и пришел к выводу, что реальной возможности для этого в недрах звезд не существует. Все ядра изотопов тяжелого водорода (H^2 и H^3), легкого гелия (He^3), лития, бериллия, бора существуют в звездах только в тех количествах, в которых они непрерывно вос-

производятся в ходе ядерных реакций. Воспроизводятся, но тут же разрушаются в результате новых реакций.

Ядра атомов углерода и азота ведут себя по-иному. Вступая в реакцию с протонами, они не исчезают бесследно, а восстанавливаются в ходе следующего цикла реакций (получившего название CN-цикла):



Разберемся в реакциях этого цикла. Они делятся на три типа. В первой, третьей и четвертой происходит радиационный захват протона ядрами углерода и азота: протон захватывается ядром, и испускается квант энергии в виде γ -лучей, которые затем поглощаются газом и вновь переизлучаются, постепенно передавая энергию из недр звезды на поверхность.

Вторая и пятая реакции — это спонтанный (самопроизвольный) бета-распад с испусканием позитрона и нейтрино. Они происходят очень быстро вслед за образованием неустойчивых ядер N^{13} и O^{15} ; время жизни последних не превышает нескольких минут.

Последняя реакция — это ядерная реакция самого общего вида, когда при столкновении двух ядер возникают два других. Ее роль очень важна: она замыкает весь цикл, восстанавливая ядро углерода C^{12} , с которого этот цикл начинается, и создавая ядро атома гелия He^4 , на построение которого в первой, третьей, четвертой и шестой реакциях уходит четыре протона.

Таким образом, нет надобности одновременно сводить в одну точку пространства четыре протона: они собираются постепенно, по одному. Конечными продуктами углеродно-азотного цикла, кроме ядра атома гелия и трех гамма-квантов, являются два позитрона и два нейтрино. Позитроны тут же аннигилируют с электронами, в избытке носящимися между ядрами, и добавляют свою энергию (в общей сложности около 3 Мэв) к энергии, выходящей сразу в виде гамма-квантов. Таким образом, каждый цикл дает на поддержание энергии Солнца около 25 Мэв . И только нейтрино, пронизывая практически беспрепятственно всю толщу Солнца, безвозвратно уносят энергию в 2 Мэв *).

*) Мэв — мегаэлектрон-вольт ($= 10^6$ электрон-вольт) — единица энергии в ядерной и атомной физике, равная $1,6 \cdot 10^{-6}$ эрг.

Сколько же времени продолжается один углеродно-азотный цикл? Расчеты Бете показывали, что обе реакции бета-распада происходят почти мгновенно, захват протона неустойчивыми ядрами C^{13} и O^{15} — через 50 тысяч и две тысячи лет соответственно. Ядро углерода C^{12} захватывает протон раз в 2,5 миллиона лет, ядро азота N^{14} — один раз в 50 миллионов лет. Таким образом, именно эта последняя реакция определяет длительность цикла.

Теперь можно было подсчитать выход энергии в результате протон-протонной реакции и углеродно-азотного цикла. Последний, как мы видели, дает 25 Мэв, или $4 \cdot 10^{-5}$ эрг, на одно ядро гелия за цикл. Почти столько же (27 Мэв) дает протон-протонная реакция. Но скорости реакций очень сильно зависят от температуры. Для протон-протонной реакции зависимость сравнительно слабая — скорость реакции пропорциональна T^4 . Для реакции $C + H$ скорость пропорциональна T^{18} , а для реакции $N + H$ — уже T^{24} . Поэтому при малых температурах (меньше 16 миллионов градусов) преобладает выход энергии от протон-протонной реакции, а при больших — от углеродно-азотного цикла (рис. 9).

Итак, источник звездной энергии был найден. Проверив на всякий случай реакции протонов с еще более тяжелыми ядрами, чем азот, и убедившись, что они не могут играть какой-либо роли в звездной энергетике, Бете решил сравнить свою теорию с наблюдениями.

При расчетах звездных моделей во второй половине 30-х годов продолжали брать стандартную модель Эддингтона, но с одной существенной поправкой. Эддингтон считал, что недра звезд состоят в основном из тяжелых элементов, и принимал средний молекулярный вес звездного газа $\bar{\mu} = 2$ (см. стр. 39). Это приводило к слишком большому значению центральной температуры, в 40 миллионов градусов, которое противоречило уравнению переноса энергии излучением, если использовать теоретическое значение прозрачности звездной материи.

Датский астрофизик Бенгт Стремгрен указал в 1937 г., что противоречие можно устранить, если предположить, что звезды до самых недр состоят в основном из водорода. Это хорошо согласовывалось и со звездными спектрами.

С тех пор при подсчете среднего молекулярного веса звездного газа все вещество звезды стали делить на три части: долю водорода X ($\mu_H = 1/2$), долю гелия Y ($\mu_{He} = 4/3$) и долю тяжелых элементов Z ($\mu_{T.O.} = 2$). Тогда

средний молекулярный вес μ можно было определить из уравнения

$$\frac{1}{\mu} = \frac{X}{\mu_{\text{H}}} + \frac{Y}{\mu_{\text{He}}} + \frac{Z}{\mu_{\text{т.э}}} = 2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}Z.$$

Но чему они равны, X , Y и Z ? Бете полагал $X = 0,35$, $Y = 0$ и $Z = 0,65$ (очевидно, что $X + Y + Z = 1$). Это давало $\bar{\mu} = 1$, и температура в центре Солнца снижалась

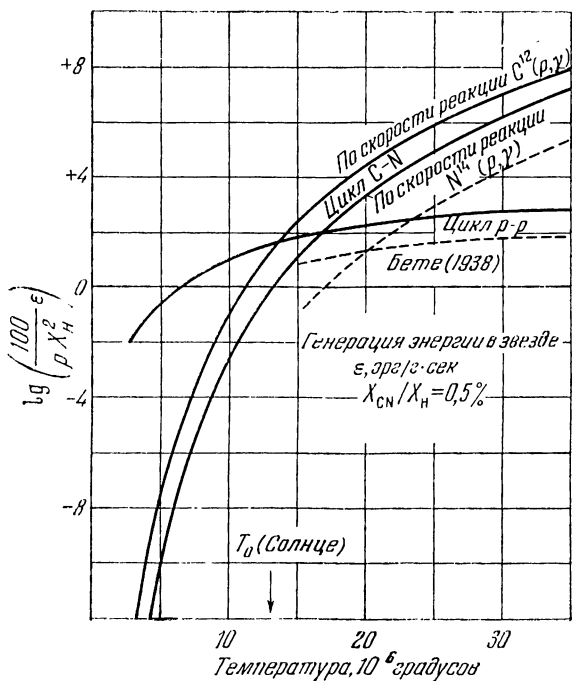


Рис. 9. Скорость протон-протонной реакции и углеродно-азотного цикла в зависимости от температуры.

вдвое против эддингтоновского значения — до 20 миллионов градусов. Оценку содержания водорода Бете взял из работы Стремгрена. Что касается тяжелых элементов, то только одного азота для нужного выхода энергии требовалось 10% состава солнечного вещества.

Но вскоре все эти оценки пришлось пересмотреть. Большая серия экспериментальных работ, проводившихся под руководством английского физика У. Фаулера, позволила не только подтвердить теорию Бете, поставив ее на

прочную экспериментальную основу, но и уточнить некоторые важные параметры. В частности, оказалось, что средний срок жизни атома N^{14} (до захвата им протона) не 50, а примерно 5 миллионов лет. Это означало сокращение общей длительности CN-цикла в 10 раз, а значит, и азота для наблюдаемого выхода энергии требовалось в 10 раз меньше, т. е. 1%. Количество углерода требовалось по тем же соображениям не более 0,5%. Из тяжелых элементов, кроме углерода, азота и почти равного им по концентрации кислорода, оставались металлы. Когда-то им отводилась главная роль в поглощении звездного излучения. Но как раз в 1939 г. Р. Вильдт доказал, что поглощение радиации в звездах создается не металлами, а отрицательными ионами водорода. Значит, и содержание металлов не могло быть большим. Величина Z получалась, таким образом, равной примерно 0,02 — 0,04, а вовсе не 0,65, как принимал первоначально Бете.

Спустя еще семь лет, в 1946 г., уже известный нам М. Шварцшильд доказал, что значительную долю массы Солнца и звезд главной последовательности должен составлять гелий. Сделал он это следующим образом. Требовалось найти две неизвестные величины X и Y . Для этого нужно было составить два уравнения, куда бы они входили. М. Шварцшильд взял в качестве одного из них уравнение, выражающее зависимость «масса—светимость» (X и Y входили туда через средний молекулярный вес и коэффициент прозрачности). Вторым было взято уравнение энергии, основанное на теории Бете, куда входила величина $Z = 1 - X - Y$. Шварцшильд построил графики обоих соотношений, отложив по осям неизвестные X и Y (рис. 10). Кривые пересеклись при $X = 0,47$, $Y = 0,41$. Получалось, что доля гелия — около 40%, и даже с учетом возможных ошибок она заключена между 30 и 50%. Для Z автоматически получалось 0,12, что было все же слишком много.

Проблема согласования звездных моделей с теорией гермоядерных реакций и с наблюдаемыми соотношениями между массой, радиусом и светимостью звезды захватила многих ученых. Начиная с 1946 г. в ее разработку включились советские ученые, прежде всего А. Б. Северный и Л. Г. Масевич. Они рассчитали целую серию звездных моделей, в том числе звезд, не лежащих на главной последовательности, — красных гигантов.

Изменение представлений об относительном содержании водорода, гелия и тяжелых элементов повлекло за собой

новое снижение оценки среднего молекулярного веса звездного газа. Уже в работе М. Шварцшильда $\bar{\mu} = 0,78$. Дальнейшие уточнения еще более повысили оценку содержания водорода за счет тяжелых элементов и гелия. В настоящее время для Солнца принимают $X = 0,65$, $Y = 0,33$, $Z = 0,02$, откуда $\bar{\mu} = 0,65$.

Эта, казалось бы, незначительная поправка к значению $\bar{\mu}$ повлекла за собой кардинальное изменение представле-

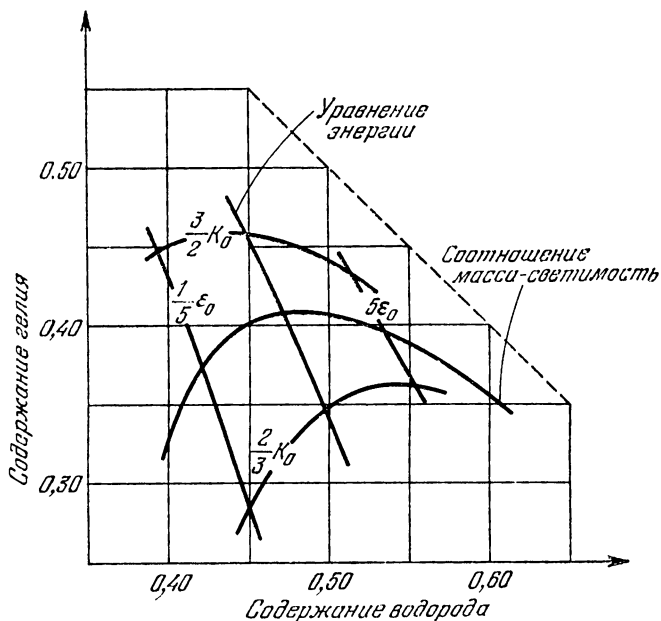


Рис. 10. График М. Шварцшильда для определения X и Y .

ний о роли двух основных циклов термоядерных реакций в выработке энергии Солнца и звезд. Согласно известной в физике теореме вириала, тепловая энергия в центре звезды в расчете на одну частицу (а значит, и температура) пропорциональна величине $\bar{\mu}$. Уменьшение $\bar{\mu}$ с 1,0 до 0,65 снижало температуру в центре Солнца с 20 до 13 миллионов градусов. Но, как ясно из рис. 9, при такой температуре основной вклад в энергию звезды будет давать уже не CN-цикл, а протон-протонная реакция, причем для более низких температур выход энергии сравнительно слабо зависит от температуры.

К началу 50-х годов общая картина генерации энергии в звездах и их внутреннего строения прояснилась. Теперь можно было, опираясь на уже полученные результаты, попытаться построить картину эволюции звезд, находящихся в различных частях Г—Р-диаграммы, и сравнить эту картину с данными наблюдений.

Эволюция вдоль или эволюция поперек?

С первых лет после построения диаграммы Герцшпрунга—Рессела в ее истолковании наметились две основные концепции:

1) Основные последовательности, или ветви, диаграммы отображают эволюционный путь звезд: каждая звезда в ходе своего жизненного пути проходит через всю последовательность (или даже две последовательности, включая ветвь гигантов). Такова была первая гипотеза Рессела и вариант второй его гипотезы с потерей массы.

2) Наиболее густо заселенные части диаграммы соответствуют наиболее устойчивым состояниям звезд различной массы, причем в ходе эволюции масса звезды почти не меняется. Такой взгляд лежал в основе варианта второй гипотезы Рессела без потери массы, близкие взгляды высказывал и ее критик Джинс.

Спустя четверть века спор о направлении звездной эволюции разгорелся с новой силой, но на более высоком уровне, поскольку источники энергии звезд были теперь известны и внутреннее строение звезд можно было рассчитывать.

Выбор между двумя концепциями зависел от решения вопроса: теряет ли звезда за время эволюции существенную долю своей массы или же нет? Выше, на стр. 22, мы уже приводили простой расчет, который показывал, что на излучение звезда типа Солнца за миллиард лет теряет около 0,01 процента своей массы. Значит, за 10 миллиардов лет — 0,1% массы. Но интенсивность излучения (а значит, и скорость потери массы) могла в прошлом быть больше.

А могла ли? Представим себе звезду с неизменной массой, постепенно сжигающую свой водород, который в ходе термоядерных реакций превращается в гелий. Так как λ уменьшается, а Y растет, средний молекулярный вес μ должен возрастать. Но из уравнения равновесия и уравнения энергии следует, что светимость звезды L пропорцио-

нальна примерно $\bar{\mu}^7$. Получается парадокс: по мере выгорания водорода светимость звезды должна в о з р а с т а т ь, т. е. звезда должна ползти по Г—Р-диаграмме не вниз, а вверх!

Именно так представлял себе эволюцию звезд еще в 1939 г. Георгий Гамов. Эволюционные пути звезд совпадали у него с линиями постоянной массы, пересекая главную последовательность наискосок: справа налево и снизу вверх (рис. 11). Гамов предполагал, что звезда проходит через серию равновесных состояний, подобных друг другу (гомологических), причем ядерные реакции продолжаютсЯ до

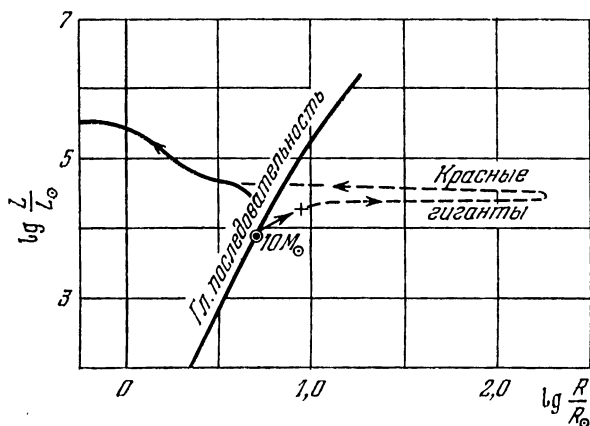


Рис. 11. Эволюция звезд по Г. Гамову.

полного исчерпания водорода. После этого температура недр звезды понижается, и звезда начинает сжиматься, поскольку давление газа при пониженной температуре не может уравновесить давления вышележащих слоев. Наступает стадия гравитационного сжатия, описываемого теорией Кельвина—Гельмгольца, и звезда превращается в белый карлик.

Гамов попытался объяснить и эволюцию красных гигантов. Он считал, что в недрах этих звезд, как и на их поверхности, температура гораздо ниже, чем у звезд главной последовательности — не более 10 миллионов градусов. Углеродно-азотный цикл при таких температурах идти не мог, и Гамов полагал, что красные гиганты «живут» за счет реакций протонов с дейтерием, литием, бериллием и бором, продвигаясь по Г—Р-диаграмме справа налево.

После выгорания дейтерия должна была включаться реакция с литием, затем с бериллием и т. д.

К красным гигантам мы вернемся позже, а пока отметим существенное противоречие теории Гамова, относящейся к эволюции звезд главной последовательности. Если звезда, сохраняя свою массу, перемещается в в е р х на $G-R$ -диаграмме, то это значит, что у нее повышается светимость. Но светимость связана с массой эмпирически установленной зависимостью «масса—светимость» (которая получила затем и теоретическое объяснение). Такой путь эволюции привел бы к большому рассеянию точек на диаграмме «масса—светимость» (одной и той же массе соответствовали бы разные светимости), что, как видно из рис. 8, не наблюдается.

Чтобы устранить это противоречие, Гамов предположил, что звезда большую часть своей жизни проводит в нижней части главной последовательности, поскольку скорость выгорания водорода (определяющая темп продвижения звезды по ее эволюционному пути вверх) пропорциональна светимости звезды и вначале довольно мала. Поэтому большинство звезд будет «сидеть» в нижних частях своего эволюционного трека, и зависимость «масса—светимость» определится в основном ими.

Совсем иное направление звездной эволюции было предложено советскими астрономами. В докладе «Современная астрофизика и космогония», прочитанном 27 октября 1947 г. на общем собрании Академии наук СССР, член-корреспондент АН СССР В. А. Амбарцумян сообщил об открытии звездных ассоциаций — групп звезд одного физического класса, имеющих общее происхождение. Подробнее о них мы расскажем в главе III, здесь же для нас важно то, что из факта наличия ассоциаций звезд разных типов, состоящих из гигантов и из карликов, В. А. Амбарцумян сделал вывод о том, что звезды вступают на главную последовательность в разных ее точках. Этот вывод впоследствии получил полное подтверждение.

Весной 1949 г. академик В. Г. Фесенков, ученый, известный своими исследованиями в самых различных областях астрофизики, предложил новую схему эволюции звезд, основанную на учете явления, которое не учитывалось прежними теориями. До тех пор астрофизики подсчитывали потерю массы звезд лишь за счет излучения и находили, что она ничтожна. Но существует еще один механизм потери массы — путем прямого выброса частиц (корпускул).

Было хорошо известно, что Солнце выбрасывает потоки заряженных частиц, которые, достигая Земли, порождают полярные сияния и некоторые другие явления в ионосфере и магнитосфере Земли. Были измерены средняя скорость и концентрация корпускул на расстоянии орбиты Земли, откуда можно было рассчитать потерю массы Солнцем за счет корпускулярного излучения: $7 \cdot 10^{17}$ г/год. Потеря массы за счет радиации составляет $1,5 \cdot 10^{20}$ г/год, т. е. в 200 раз больше. Но у других звезд картина могла быть иной.

Впрочем, В. Г. Фесенков исходил совсем не из оценки современной потери массы Солнцем за счет корпускулярного излучения, а из более общих соображений. Прежде всего, явление корпускулярного излучения свойственно не только Солнцу, но и всем звездам вообще. Об этом можно судить, например, по наблюдениям быстро вращающихся звезд, которые, как показывают их спектры, окружены протяженными газовыми оболочками, образующими в экваториальной плоскости расширение в форме диска.

В. Г. Фесенков предположил, что интенсивность корпускулярного излучения пропорциональна обычному излучению, т. е. светимости звезды. Через соотношение «масса—светимость» это связывало убыль массы с самой массой: получалось, что убыль массы пропорциональна кубу или даже четвертой степени массы. Значит, у наиболее массивных звезд скорость потери массы очень велика, а по мере убывания массы она быстро снижается и у звезд типа Солнца сравнительно невелика.

Действительно, среди массивных звезд известны такие типы, которые характеризуются интенсивным выбрасыванием материи. Таковы, например, звезды типа Р Лебеда — быстро вращающиеся яркие сверхгиганты с протяженными расширяющимися оболочками, иногда меняющие свой блеск и даже вспыхивающие, подобно новым. Другой, близкий к ним класс звезд — звезды типа Вольфа—Райе имеют широкие полосы излучения, говорящие о наличии быстро расширяющихся оболочек (со скоростями расширения до 1500 км/сек). Можно подсчитать, что звезда типа Вольфа—Райе, имеющая массу около 10 масс Солнца, выбрасывает в год 10^5 солнечной массы, т. е. на 10 порядков больше, чем Солнце.

Зная возраст Солнца, В. Г. Фесенков составил соотношение между начальной массой Солнца и уменьшением содержания в нем водорода. Оказалось, что если содержа-

ние водорода уменьшилось за 5 миллиардов лет на 25%, то начальная масса Солнца была в 5 раз больше современной, а если на 35% — то в 10 раз. В. Г. Фесенкову удалось также доказать, что другим следствием потери массы звездой является уменьшение ее момента вращения⁴⁾). Это полностью соответствует наблюдениям: звезды, находящиеся в верхней левой части главной последовательности (гиганты классов В и А), имеют, как показывает расширение линий в их спектрах, наибольшую скорость вращения.

Работу В. Г. Фесенкова продолжила молодая исследовательница-теоретик А. Г. Масевич. Исходя из трех основных предположений: 1) о ядерных реакциях как источнике энергии Солнца, 2) о выполнении в ходе всей его эволюции соотношения «масса—светимость» и 3) об уменьшении массы звезды вследствие корпускулярного излучения, она попыталась построить эволюционную кривую Солнца. В качестве модели Солнца она приняла уже известную нам модель М. Шварцшильда (см. стр. 59) и мало отличающуюся от нее модель М. Хэрисон, в которой $X = 0,53$, $Y = 0,37$, $Z = 0,10$. В обеих моделях Солнце состоит из конвективного ядра радиусом $(0,10 \div 0,12) R_{\odot}$ и оболочки, находящейся в лучистом равновесии. Варьируя на основании предположения 3) массу Солнца M в прошлом и получая его светимость L по предположению 2), можно было определить радиус Солнца R и содержание водорода X и нанести эволюционный путь Солнца на диаграмму «радиус—светимость». Этот путь прошел недалеко от расположения звезд главной последовательности на этой диаграмме, хотя и выше большинства из них (рис. 12). Это означало, что Солнце должно было иметь в прошлом несколько большую светимость и массу при тех же значениях радиуса, чем большинство звезд.

Спустя два года, в 1951 г., А. Г. Масевич выполнила новое исследование эволюционного пути Солнца и нанесла его на G — P -диаграмму. Теоретическая кривая прошла на этот раз в самой гуще звезд главной последовательности. А. Г. Масевич продолжила ее и в сторону меньших светимостей, к красным карликам. И здесь кривая шла прямо через середину полосы, занятой точками-звездами.

⁴⁾ Момент вращения пропорционален произведению радиуса звезды на ее массу и скорость вращения. В случае неизменной массы и отсутствия внешних воздействий момент вращения звезды постоянен.

Эта кривая была построена для $Z = 0,12$ (модель М. Шварцшильда). А. Г. Масевич попробовала построить серию кривых для разных Z , и они разместились близко

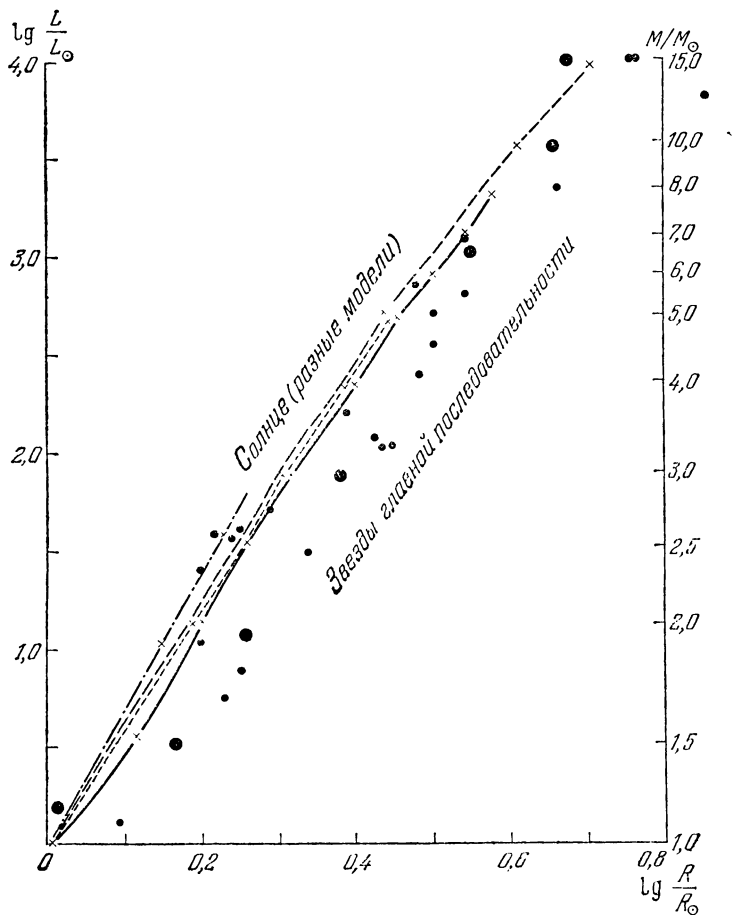


Рис. 12. Эволюционный путь Солнца (по А. Г. Масевич). (Изображен линиями, соответствующими различным моделям; кружки — положения опорных звезд по П. П. Паренаго.)

друг к другу по всей ширине главной последовательности (рис. 13). Успех работы был полный — объяснился разброс точек поперек главной последовательности. Причиной его, как следовало из расчетов А. Г. Масевич, было различие

в содержании тяжелых элементов: примерно от $Z = 0,05$ (и даже меньших значений) до $Z = 0,50$.

Концепция Фесенкова—Масевич об эволюции звезд вдоль главной последовательности сверху вниз, от белых

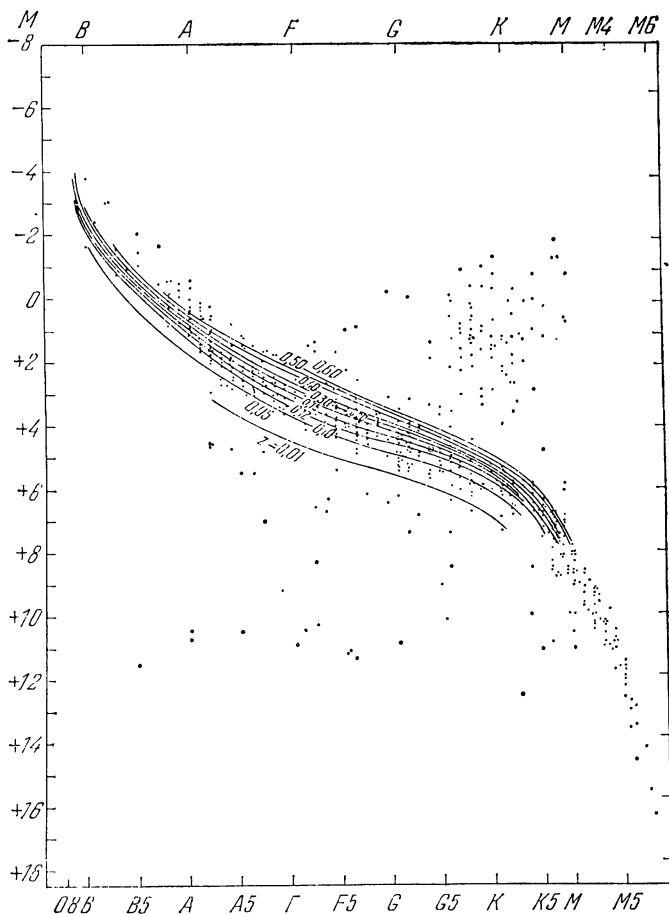


Рис. 13. Эволюционные пути звезд с разными Z на Γ — R -диаграмме (по Л. Г. Масевич). Шкала спектральных классов сверху — для гигантов, внизу — для карликов.

гигантов к красным карликам, была поддержана рядом советских ученых (П. П. Паренаго, В. С. Сорокин, В. А. Амбарцумян). В то же время каждый ученый стремился внести в картину звездной эволюции что-то новое.

П. П. Паренаго, талантливый астроном-звездник, в течение многих лет возглавлявший московскую школу звездной астрономии, тщательно исследуя диаграмму Герцшпрунга—Рессела, открыл на ней новую последовательность — ветвь ярких субкарликов, идущую параллельно главной последовательности, ниже и левее ее. Он же показал, что предположение о пропорциональности потери массы звездами их светимости хорошо согласуется с наблюдаемым распределением звезд по светимостям (с «функцией светимости»).

Другой известный московский астроном, специалист по физике звезд, Б. А. Воронцов-Вельяминов обнаружил в 1947 г., что звезды Вольфа—Райе, новые звезды, ядра планетарных туманностей (яркие горячие звезды, находящиеся в центре этих туманностей) и, наконец, белые карлики лежат вдоль полосы, идущей по левому краю Г—Р-диаграммы сверху вниз, почти вертикально. Эта полоса получила название бело-голубой последовательности. Б. А. Воронцов-Вельяминов придал новой последовательности эволюционный смысл, высказав гипотезу, что голубые горячие звезды класса О проходят через стадию звезд Вольфа—Райе, затем повторных новых (вспыхивающих неоднократно), обычных новых, ядер планетарных туманностей и превращаются в белые карлики.

Пулковский астроном В. А. Крат (ныне член-корреспондент АН СССР, директор Пулковской обсерватории), опираясь на оценки возраста различных типов звезд и на открытый академиком Г. А. Шайном факт быстрого вращения гигантских звезд классов О и В, нарисовал такой путь звездной эволюции: от бело-голубых сверхновых классов О и В через стадию звезд Вольфа—Райе (быстрое вращение порождает интенсивный выброс частиц) к красным гигантам, а затем на главную последовательность. Два последних перехода В. А. Крат объяснял так. Звезда Вольфа—Райе, теряя массу, должна испытать уменьшение давления внешних слоев, что приведет к ее расширению и охлаждению. В недрах звезды прекратятся термоядерные реакции. Звезда станет красным гигантом. Но охлаждение недр звезды вызовет новое сжатие, сопровождающееся ее разогреванием и восстановлением термоядерных реакций. Оболочка звезды спадет, и звезда вступит на главную последовательность.

Еще более замысловатый путь эволюции звезд предположил советский астрофизик А. И. Лебединский. Сог-

ласно его гипотезе, «звезды возникают где-то в области субгигантов или гигантов, затем, теряя массу, переходят на главную последовательность в области спектральных классов F — G, затем, захватывая пыль из туманностей *), пересекают в стадию горячих гигантов и, вновь теряя массу, движутся вниз вдоль главной последовательности».

Вы заметили, читатель, что описание последней гипотезы мы взяли в кавычки. Да, это не наше изложение. Не принадлежит оно и автору гипотезы, А. И. Лебединскому. Так охарактеризовала эту гипотезу А. Г. Масевич в своем выступлении на Втором совещании по вопросам космогонии 22 мая 1952 г. Перед этим она кратко перечислила взгляды В. А. Амбарцумяна, В. А. Крата, Б. А. Воронцова-Вельяминова. В ее словах звучала горечь.

«Если мы обратимся к литературе по звездной эволюции, — продолжала она, — то найдем еще много других вариантов, согласно которым звезды совершают самые удивительные путешествия по диаграмме «спектр—светимость», с различными переходами от одного спектрального класса к другому».

Можем ли мы при настоящем уровне наших знаний сделать более или менее определенный вывод из всего этого многообразия, найти то направление эволюции, которое, хотя бы качественно, отражало действительное положение вещей? Я думаю, что безусловно можем и должны этого добиваться».

Можно было понять А. Г. Масевич. Ей, привыкшей получать результаты из кропотливых расчетов звездных моделей и эволюционных путей звезд, были совсем не по душе эмпирические и качественные подходы к такой сложной проблеме, как эволюция звезд.

Но и решения, полученные самой А. Г. Масевич, были несовершенными. Ведь любое решение хорошо только в том случае, если условия задачи сформулированы правильно и строго. Между тем в теории Масевич, развивавшей идеи В. Г. Фесенкова, делались следующие упрощающие предположения:

а) что звезда является однородной и в ней происходит полное перемешивание вещества,

*) Согласно гипотезе А. И. Лебединского, звезды, пересекая газово-пылевые туманности, могут захватывать из них массу, сравнимую с их собственной, и превратиться в гиганты классов O и B. Такая точка зрения была навеяна идеями О. Ю. Шмидта о захвате Солнцем газово-пылевой туманности, давшей начало планетам.

б) что звезда теряет массу за счет корпускулярного излучения в ходе всей эволюции, причем скорость потери массы пропорциональна излучению,

в) что основным механизмом генерации энергии в звездах типа Солнца и ярче является CN-цикл,

г) что в начале эволюции доля водорода составляет $X = 1 - Z$, а доля гелия $Y = 0$.

Конечно, эти предположения сильно сужали постановку задачи. Дальнейшее развитие наших представлений о физике звезд показало, что предположение а) обычно не выполняется, предположение б) справедливо лишь для некоторых классов звезд, предположение в) верно только для горячих звезд ранних классов (в звездах типа Солнца преобладает протон-протонная реакция). Что касается предположения г), то, как отметила позже сама А. Г. Масевич, значения Z , использованные в ее расчетах, не следовало понимать буквально: они брались в диапазоне от $1/3$ до 3 значений Z для Солнца, и, если бы для Z_{\odot} пришлось выбрать другое значение, изменились бы и все остальные Z .

Несмотря на все это, работы советских ученых по теории звездной эволюции, выполненные в период 1947—1952 гг., сразу привлекли внимание ученых других стран и заняли достойное место в мировой науке. Советские ученые выступили на международном симпозиуме по эволюции звезд в Риме в сентябре 1952 г., где вводный доклад сделал В. А. Амбарцумян, на международном коллоквиуме в Льеже в сентябре 1953 г., где прочитали доклады А. Г. Масевич, Э. Р. Мустель, В. А. Амбарцумян, Г. А. Шайн и И. С. Шкловский, и на других международных конференциях.

А как же развивалась в это время та же проблема за рубежом?

Интерес к ней всюду был громадный, и в разработку проблемы включились многие астрофизики разных стран. Повсюду рассчитывали звездные модели, прокладывали эволюционные пути звезд на диаграмме «спектр—светимость». К середине 50-х годов число опубликованных по этой проблеме работ перевалило за 500.

Развивая теорию начальной фазы эволюции двуслойных моделей звезд, состоявших из конвективного ядра и лучистой оболочки (см. стр. 36), С. Чандрасекар и М. Шенберг сделали еще в 1942 г. важное открытие. Они установили, что для каждой величины отношения средних молекулярных весов ядра и оболочки $\mu_{\text{я}}/\mu_{\text{об}}$ относительная масса ядра

имеет некоторое максимальное значение. Если оно будет превышено, между ядром и оболочкой не будет плавного перехода: они, как говорят ученые, не сшиваются. Такое критическое состояние звезды получило название предела Шенберга—Чандрасекара.

Спустя 10 лет, в 1952 г., американские астрофизики А. Сэндидж и М. Шварцшильд рассмотрели состояния, которые проходит модель звезды (без перемешивания между ядром и оболочкой) после достижения предела Шенберга—Чандрасекара.

Пока в конвективном ядре не выгорел весь водород, звезда еще не достигает предела. Но вот источники энергии

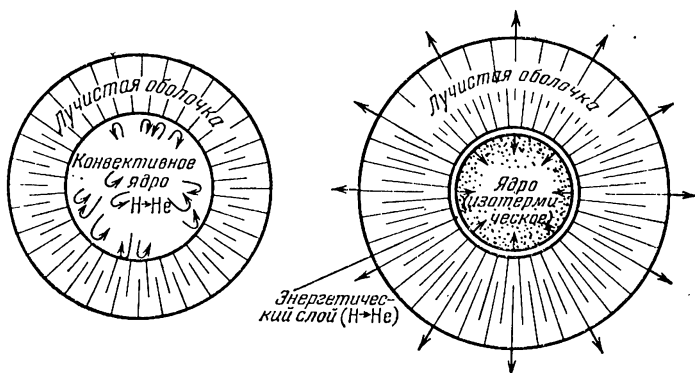


Рис. 14. Последовательные стадии развития звезды (по А. Сэндиджу и М. Шварцшильду).

иссякают, выработка энергии в ядре прекращается, конвекция останавливается. Во всем ядре устанавливается одинаковая температура, оно становится изотермическим. За счет превращения водорода в гелий отношение $\mu_{\text{я}}/\mu_{\text{об}}$ возрастает, а значение предельной массы ядра уменьшается (оно минимально при $\mu_{\text{я}}/\mu_{\text{об}} = 2$ и равно 0,1 массы звезды). Звезда достигает предела Шенберга—Чандрасекара, и с этого момента источники энергии концентрируются в довольно тонком слое, расположенном между изотермическим ядром и лучистой оболочкой (рис. 14). По расчетам Сэндиджа и Шварцшильда, около 90% энергии в это время вырабатывается в слое толщиной 0,4% радиуса звезды. Остальная энергия поступает за счет гравитационного сжатия ядра, которое начинается тотчас же после истощения в нем ядерных источников энергии. Между тем оболоч-

ка, непрерывно подогреваемая промежуточным тонким слоем, наоборот, расширяется. Звезда сходит с главной последовательности и начинает быстро перемещаться вправо, поперек ее.

Сэндидж и Шварцшильд подошли совсем близко к объяснению происхождения красных гигантов, но не смогли решить эту задачу. К тому же как раз в эти годы появились новые важные факты в области звездной астрономии, и теоретикам нужно было осмыслить их, а затем согласовать с ними свою теорию.

Открытия в звездной астрономии

В годы второй мировой войны на американской обсерватории Маунт Вилсон, на тогда еще крупнейшем в мире 2,5-метровом рефлекторе, проводил фотографирование избранных участков неба астроном Вальтер Бааде. Уроженец Германии, он с 1929 г. работал в США, но сохранял германское подданство. Когда Соединенные Штаты в 1941 г. вступили в войну, Бааде был объявлен «союзником врага» и ему было запрещено выезжать за пределы обсерватории. Но он продолжал работать, используя исключительно темные ночи, так как в Лос-Анджелесе и других близлежащих городах было введено затемнение.

В 1944 г. Бааде сделал ряд очень важных открытий. Фотографируя эллиптические галактики, он впервые смог разложить их на звезды и доказать тем самым, что они состоят из звезд. Затем он разложил на звезды ядро галактики в Андромеде. Не удовольствовавшись этими чисто внешними результатами, Бааде построил для звезд этих галактик верхнюю часть диаграммы Герцшпрунга—Рессела (изучать можно было только гиганты). Диаграмма получилась совсем не такая, как для таких же звезд нашей Галактики, но зато очень напоминала диаграммы «спектр—светимость», построенные еще в 1915 г. на той же обсерватории Харлоу Шепли — тогда еще молодым астрономом, учеником Г. Н. Рессела, впоследствии ставшим директором Гарвардской обсерватории.

Бааде решил сам заняться шаровыми звездными скоплениями. У него получился тот же результат, что и у Шепли: красные гиганты оказались в шаровых скоплениях гораздо ярче, чем голубые, а диаграмма «спектр—светимость» имела вид вилки, обращенной влево и вниз (рис. 15).

Вскоре Бааде обнаружил, что звезды нашей Галактики можно разделить по этому признаку на два «населения»: население I, к которому относилось большинство звезд плоской составляющей Галактики, а также звезды рассеянных звездных скоплений, и население II, к которому относились звезды шаровых звездных скоплений, а также звезды с большими скоростями, короткопериодические цефеиды типа RR Лиры и некоторые другие. К такому же типу относились звезды эллиптических галактик и ядер спиральных галактик.

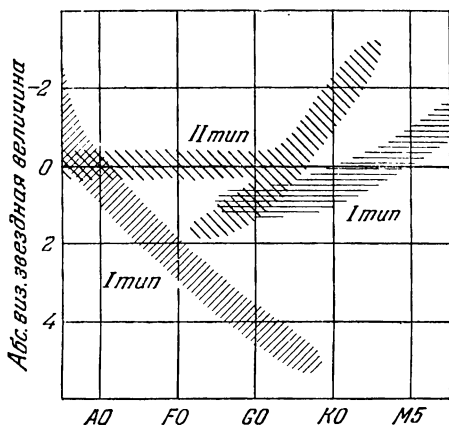


Рис. 15. Диаграмма «спектр — светимость» для населения I и для населения II (по Бааде).

В 1947—1949 гг. советский астроном Б. В. Кукаркин проделал громадную работу по изучению пространственного распределения звезд различных типов, главным образом переменных звезд: короткопериодических цефеид (типа RR Лиры), долгопериодических цефеид, звезд типа Миры Кита, новых звезд и других. Одновременно П. П. Паренаго изучил их кинематические характеристики. Проведение этой работы облегчалось тем, что оба исследователя составили в это время «Общий каталог переменных звезд», куда вошло свыше 10 000 звезд. Данные по каждой звезде выписывались на специальную карточку со всеми необходимыми библиографическими ссылками. Это помогло проведению исследования распределения и движений этих звезд в Галактике.

Вот к каким выводам пришел Б. В. Кукаркин. Звезды в Галактике делятся по меньшей мере на три подсистемы: плоскую, совпадающую с населением I по Бааде, сферическую, совпадающую с населением II, и промежуточную. Долгопериодические цефеиды и новые звезды образуют резко выраженные плоские подсистемы. Напротив, звезды типа RR Лиры образуют сферическую подсистему, хотя вблизи плоскости Галактики наблюдается некоторая их концентрация к этой плоскости. Звезды типа Миры Кита принадлежат к промежуточной подсистеме.

Исследования П. П. Паренаго показали, что звезды сферической подсистемы обладают очень быстрыми движениями (относительно Солнца): 150—200 км/сек, тогда как средние относительные скорости звезд плоской подсистемы—порядка 10 км/сек. Таким образом, и по кинематическим характеристикам эти подсистемы резко отличались друг от друга.

Оставалось сделать вывод, что они отличаются и по возрасту. Еще в 1938 г. В. А. Амбарцумян показал, что рассеянные звездные скопления, такие, как Плеяды, Гиады и Ясли, должны быть сравнительно молодыми образованиями, так как под действием окружающих звезд (в том числе проходящих вблизи скопления) они распались бы за время, превосходящее 3 миллиарда лет. Девять лет спустя В. А. Амбарцумян привел другой важный довод в пользу молодости рассеянных скоплений: в них встречаются горячие звезды спектральных классов O и B, звезды типа R Лебеда и Вольфа—Райе, которые не могут быть старше 10^7 лет.

Напротив, шаровые звездные скопления благодаря многочисленности входящих в них звезд (десятки тысяч и более против сотен в рассеянных скоплениях) устойчивы по отношению к распаду (т. е. могут существовать очень долго), а главное — в них совершенно отсутствуют сверхгиганты классов O и B, звезды типов Вольфа—Райе и R Лебеда. Значит, звезды шаровых скоплений гораздо старше, чем в рассеянных.

Все эти выводы Б. В. Кукаркин распространил на звезды плоской и сферической подсистем как в нашей, так и в других галактиках. Стало ясно, что звезды сферической подсистемы старше, чем звезды плоской подсистемы.

Между тем, начиная с 1951 г., Г. Джонсон и его сотрудники на обсерватории Маунт Вилсон начали обширную программу построения Г—Р-диаграмм для многих рассеян-

ных звездных скоплений. Одновременно Г. Арп, А. Сэндидж и их сотрудники провели такую же работу в отношении шаровых звездных скоплений. Обе программы были завершены в 1956 г., а в 1957 г. А. Сэндидж опубликовал сводную диаграмму для рассеянных скоплений (рис. 16).

Анализ этой диаграммы говорил о многом. Во всех рассеянных скоплениях наблюдается поворот от главной последовательности вправо, но по мере увеличения возраста

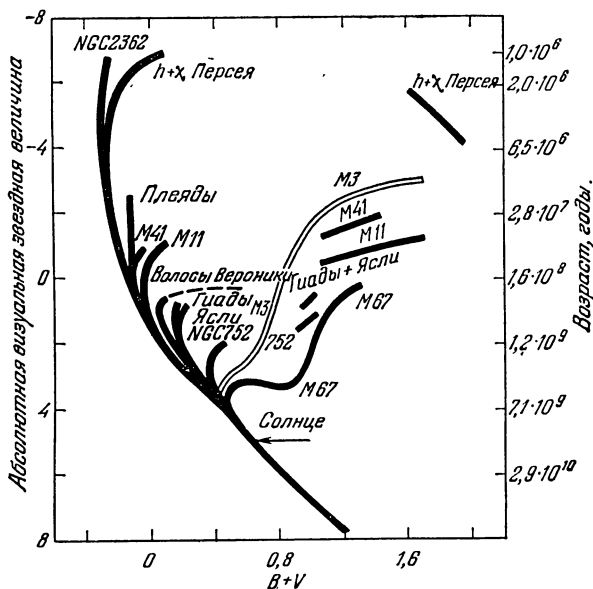


Рис. 16. Сводная Г — Р-диаграмма для рассеянных скоплений (по Сэндиджу).

скопления это происходит при все более и более низких светимостях. Самым молодым является рассеянное скопление NGC 2264, звезды которого расположены почти все правее главной последовательности, параллельно ей. Исследовавший это скопление астроном М. Уокер показал, что звезды в нем еще находятся в состоянии гравитационного сжатия, которое приведет их на главную последовательность. Возраст звезд этого скопления — от 2 до 5 миллионов лет. Другим примером очень молодого скопления является звездное скопление в туманности Ориона, подробно изученное П. П. Паренаго. Между «отростком», отходящим от главной последовательности вправо, и отрезком ветви

гигантов того же скопления наблюдается ясно заметный пробел — пробел Герцшпрунга. В этой области диаграммы звезд почти нет.

Самым старым среди рассеянных скоплений является М 67, имеющее довольно много красных гигантов, но совсем не имеющее звезд классов О и В. Его возраст оценивается в 5 миллиардов лет и приближается к возрасту шаровых звездных скоплений. Характерной особенностью диаграммы этого скопления является отсутствие у него пробела Герцшпрунга.

Между этими крайними случаями на шкале возрастов располагаются известные скопления χ и h Персея, Плеяды, Волосы Вероники, Гиады, Ясли и некоторые другие, показанные на диаграмме. Ширина пробела Герцшпрунга по мере перехода к более молодым скоплениям растет.

Совсем иной вид имеет диаграмма для шаровых звездных скоплений. Типичными среди них являются скопления М 3 (в Гончих Псах), М 13 (в Геркулесе) и М 92 (в Геркулесе). Главная последовательность у них представлена лишь коротким отрезком в нижней части. Ветвь красных гигантов соединяется с нею ветвью субгигантов (рис. 17). Кроме того, выделяется горизонтальная (голубая) полоса, содержащая характерный пробел, заполненный только короткопериодическими цефеидами типа RR Лиры. С обеих сторон этого четко выделенного пробела располагаются звезды постоянного блеска. Стало ясно, что состояние звезды, находящейся в этом месте диаграммы, не может быть устойчивым и что-то заставляет звезду быстро пульсировать (с периодом в несколько часов, а то и меньше).

Чтобы удобно было сравнить диаграммы «цвет—светимость» для шаровых и рассеянных звездных скоплений, на рис. 16 показаны схематически ветви для старого рассеянного скопления М 67 и типичного шарового скопления М 3.

Как установил в 1957 г. П. П. Паренаго, Г—Р-диаграмма для звезд сферической подсистемы нашей Галактики очень похожа на диаграмму для шаровых скоплений.

Мы видим, что уже сопоставление Г—Р-диаграмм различных по возрасту звездных скоплений (а звезды одного скопления имеют примерно одинаковый возраст) давало богатую пищу для размышлений и требовало от теоретиков своего объяснения.

Но в те же годы, и даже несколько раньше, было сделано еще одно важное открытие из области звездной астрономии,

касающееся не отдельных звездных скоплений и даже не определенных типов звездных систем, а строения самой главной последовательности. В 1949—1950 гг. П. П. Паренго совместно с А. Г. Масевич установил, что главная последовательность примерно посередине, в районе спектрального класса G4, делится на две части. Собственно, сама последовательность на Г—Р-диаграмме идет гладко, не испытывая разрыва, но некоторые свойства звезд в этом

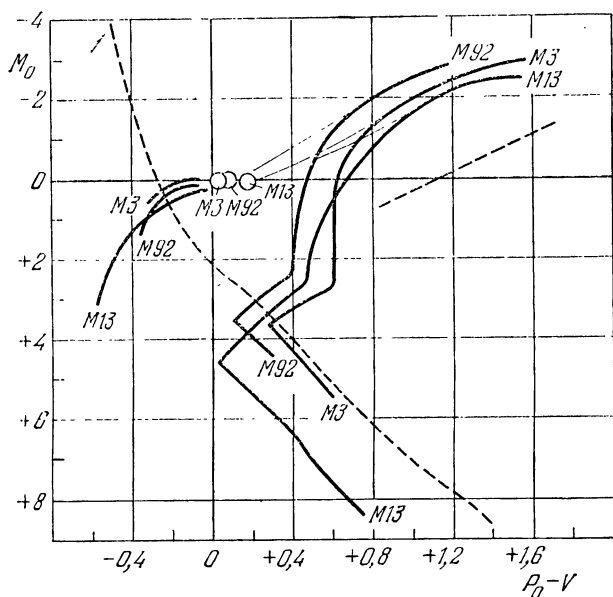


Рис. 17. Г—Р-диаграмма для шаровых звездных скоплений (по Сэндиджу). Пунктиром показаны основные последовательности звезд Галактики, кружки — область звезд типа RR Лиры.

месте резко меняются. Так, меняется характер зависимостей «масса—светимость» и «масса—радиус», меняются кинематические характеристики звезд. Резко уменьшается и скорость их вращения.

Этот факт, которому сперва не придавали особого значения и даже пытались оспаривать, впоследствии приобрел большое значение для построения теории эволюции звезд с различными массами.

Итак, период 1944—1957 гг. оказался для звездной астрономии необычайно плодотворным. А главное —

полученные астрономами-звездниками результаты давали направляющую нить теоретикам, занимавшимся проблемой звездной эволюции. И те не замедлили этой нитью воспользоваться.

Картина звездной эволюции проясняется

Первый шаг для объяснения эволюции звезд шаровых скоплений сделали Мартин Шварцшильд и Фред Хойл в 1955 г. Они впервые произвели расчет модели звезды с массой чуть больше солнечной, со сжимающимся изотермическим ядром. Собственно говоря, это был расчет не одной модели, а целой серии моделей, отражающих путь эволюции звезды с того момента, когда ее ядро целиком состоит из водорода и только начинается протон-протонная реакция, и до состояния, когда уже 80% водорода в ходе этой реакции превращено в гелий.

С момента начала термоядерных реакций (которые, естественно, происходят во внутренних частях звезды, где создаются необходимые для них высокие температуры) в первоначально однородной звезде формируются конвективное ядро и лучистая оболочка. Почему ядро будет конвективным, мы уже пояснили (стр. 36). Дальше все происходит, как в расчете Сэндиджа и Шварцшильда: водород в ядре выгорает, образуется сжимающийся гелиевое изотермическое ядро и тонкий энергетический шаровой слой между ядром и оболочкой, где еще продолжается горение водорода; оболочка расширяется и становится непрозрачной, звезда смещается на Γ — R -диаграмме вправо и вверх от главной последовательности, вдоль ветви субгигантов, достигая области красных гигантов.

Между тем температура ядра продолжает расти, растет и его масса. В центральных частях ядра давление становится столь велико, что наступает состояние вырождения: начинает сказываться взаимное квантовомеханическое влияние частиц, особенно электронов, и газ из набора частиц превращается в единую систему, что-то вроде гигантского кристалла. С наступлением вырождения рост температуры ядра звезды слабо влияет на ее структуру.

Но вот температура в ядре достигает 100 миллионов градусов. При такой температуре может начаться новая термоядерная реакция, изученная американским астрофизиком Э. Салпетером в 1952 г., — выгорание гелия:



Как только началось выгорание гелия, возникает новый источник энергии в недрах звезды. Эта энергия не успевает отводиться излучением и целиком идет на повышение тепловой энергии ядер гелия, что приводит к ускорению ядерных реакций. В результате температура, а значит, и выделение энергии повышаются еще больше. Происходит «гелиевая вспышка» звезды. Температура близ центра звезды достигает 400 миллионов градусов, плотность — 10^5 г/см³, скорость выделения энергии — 10^4 эрг/г·сек. Звезда в это время светит в 10 000 раз сильнее, чем Солнце, и достигает верхней части своего пути на ветви гигантов.

Возможность «гелиевой вспышки» была предсказана Хойлом и Шварцшильдом еще в их работе 1955 г., но подробное исследование этой стадии было выполнено Шварцшильдом, Хермом и Зельбергом уже в 1962 г. Почти вся энергия, освобождающаяся от выгорания гелия, идет на снятие вырождения. Этот процесс постепенно распространяется от внешних слоев ядра к центру. Когда ядро становится невырожденным, оно расширяется и потому охлаждается. Температура в центре падает до 120 миллионов градусов, плотность уменьшается в 10 раз. Светимость звезды падает на 2—3 звездные величины, т. е. тоже примерно в 10 раз. «Гелиевая вспышка» заканчивается. Весь этот процесс происходит очень быстро — например, спад светимости после вспышки занимает около двух суток. За период вспышки только около 5% ядер гелия успевают превратиться в углерод.

Чтобы читатель не сомневался, что вся описанная выше последовательность процессов — это не просто плод рассуждений и логических построений, даже основанных на физических и астрономических соображениях, приведем такой факт. Для изучения только стадии «гелиевой вспышки» Шварцшильду и Зельбергу пришлось рассчитать 600 моделей различных состояний звезды. Разумеется, это было бы невозможно без электронно-вычислительных машин. Внедрение машинных методов расчета намного ускорило и облегчило расчет звездных моделей и хода их эволюции.

Работы М. Шварцшильда и его сотрудников позволили не только проследить ход эволюции звезд с массой, близкой к солнечной, но и объяснить вид Г — Р-диаграммы для шаровых скоплений, а также для звезд сферической подсистемы нашей Галактики.

Конечный этап эволюции звезды типа Солнца: прохождение пробела Герцшпрунга по горизонтальной части ветви

гигантов, затем потеря некоторой доли массы и сжатие до состояния белого карлика. Но подробно рассчитать эту стадию эволюции Шварцшильду и его сотрудникам не удалось. Это было сделано гораздо позже советскими учеными.

Как же должна протекать эволюция звезд большой массы? Расчеты для звезд с $M = (5 \div 9) M_{\odot}$ были проделаны в 1964—1965 гг. астрономами Института физики и астрофизики имени Макса Планка в Мюнхене (ФРГ) под

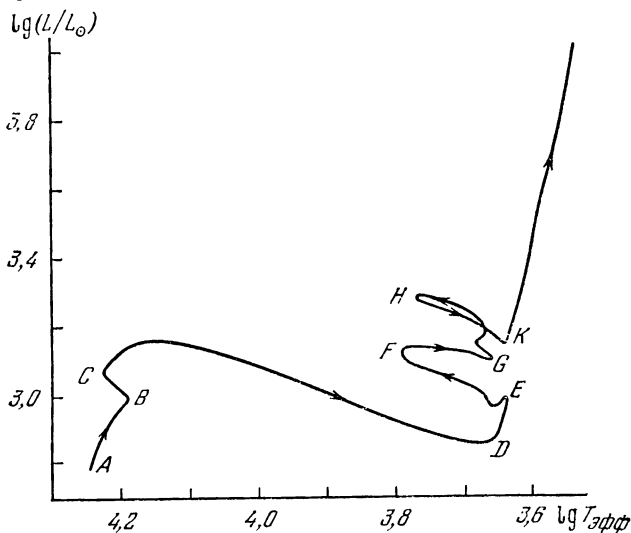


Рис. 18. Эволюционный путь звезды с $M = 5M_{\odot}$ на Г — Р-диаграмме (по Киппенхану).

руководством Р. Киппенхана. Большая серия расчетов для звезд от 4 до $30 M_{\odot}$ была проведена в 1965—1967 гг. в Астрономическом совете АН СССР под руководством А. Г. Масевич.

Рассмотрим в качестве примера эволюционный путь звезды с $M = 5 M_{\odot}$, рассчитанный группой Киппенхана (рис. 18). Выглядит он на первый взгляд довольно замысловато (график построен в координатах «температура—светимость»). Но проследим все по порядку. Перед нами звезда — голубой гигант спектрального класса В5. В начальный момент (точка А на графике) звезда находится на главной последовательности. Она состоит из конвективного ядра (21% массы звезды) и лучистой оболочки. В ядре происхо-

дит выгорание водорода от $X = 0,6$ в точке A до $X = 0,05$ в точке B . Путь звезды на диаграмме от A к B занимает «всего» $5,4 \cdot 10^7$ лет. Дальше ядро становится изотермическим и появляется шаровой энергетический слой, где продолжается выгорание водорода (отрезок BC). Центральные части звезды начинают сжиматься, а наружные — расширяться. Звезда проходит на диаграмме путь CD . В это время у нее два источника энергии: выгорание водорода в энергетическом слое и гравитационное сжатие изотермического гелиевого ядра.

Эти этапы весьма напоминают ход эволюции звезды малой массы. Но есть и отличия. Во-первых, весь процесс эволюции и отдельные его этапы протекают в этом случае гораздо быстрее. Во-вторых, звезды с большими массами проходят через пробел Герцшпрунга не после, а до достижения стадии красного гиганта. В-третьих, приближаясь к точке D , звезда пересекает область, занимаемую на $\Gamma - R$ -диаграмме классическими цефеидами — пульсирующими звездами. Правда, это первое прохождение через область цефеид продолжается весьма недолго — лишь несколько тысяч лет.

Но чем дальше, тем различий становится больше. Когда температура в гелиевом ядре достигает 100 миллионов градусов, начинается выгорание гелия, превращение его в углерод. Однако, поскольку центральная плотность у гигантских звезд сравнительно мала, вырождение вещества не наступает, вся энергия, вырабатываемая в ядре, излучается с поверхности звезды, «гелиевая вспышка» не происходит. Светимость звезды возрастает до некоторого момента, соответствующего началу расширения ядра (точка E).

Между тем в наружных слоях звезды возникает конвективная зона, которая проникает все глубже, почти до середины радиуса. В центре гелиевого ядра также образуется конвективное ядрышко, масса которого в точке E достигает почти 5% массы звезды.

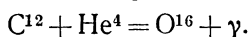
Дальше ход событий во внутренних частях звезды до некоторой степени повторяется. В конвективном внутреннем ядре гелий выгорает, превращаясь в углерод. На границе углеродного ядра появляется гелиевый шаровой энергетический слой, где выгорание гелия продолжается. В углеродном ядре исчезает конвекция, оно становится изотермическим, начинает сжиматься и разогреваться. Звезда проходит на диаграмме участок EF .

Некоторое время энергию звезде поставляют два источника: внутренний шаровой слой, где выгорает гелий, и внешний шаровой слой, где еще продолжает выгорать водород. Но он дает все меньшую и меньшую долю энергии.

В ходе сжатия углеродного внутреннего ядра звезды ее наружная оболочка испытывает попеременно то фазу расширения, то фазу сжатия. Это зависит от того, возрастает или уменьшается глубина внешней конвективной зоны. В соответствии с этими изменениями путь звезды на диаграмме изображается треками *FG*, *GH* и *HK*.

В точке *H* водородный слоевой источник выходит во внешние слои звезды, где температура слишком низка для того, чтобы могла проходить термоядерная реакция, поэтому он отмирает. Центральные части звезды продолжают сжиматься, а наружные — расширяться. Последняя фаза расширения, соответствующая участку *HK* кривой, проходит так быстро, что внешние слои поглощают более половины энергии, излучаемой ядром. Глубина внешней конвективной зоны возрастает еще больше, она занимает уже более 80% радиуса звезды, проникает в гелиевую лучистую оболочку, благодаря чему содержание гелия в наружных слоях увеличивается. В период выгорания гелия светимость звезды меняется сравнительно мало.

Но вот звезда достигает точки *K*. Тут в центре звезды температура поднимается настолько, что начинается новая термоядерная реакция — выгорание углерода. Атом углерода может захватить альфа-частицу (ядро атома гелия) и превратиться в атом кислорода:



Светимость звезды начинает резко возрастать, и она переходит в стадию красного гиганта. К этому времени она излучает в 10 000 раз мощнее, чем Солнце.

Чтобы проследить ход эволюции звезды, схематически показанный на рис. 18, Киппенхану и его сотрудникам понадобилось рассчитать 800 моделей ее последовательных состояний!

Но насколько реальны полученные результаты? Особенно удивительны «качания» и «петли», описываемые массивными звездами в районе пробела Герцшпрунга. Такие зигзаги и петли получились не только в расчетах Киппенхана и его группы, но и в расчетах советских исследователей, работавших под руководством А. Г. Масевич, а также в расчетах других ученых из разных стран. Ясно

видно, что в ходе «качаний» звезда пересекает область, занятую на диаграмме классическими цефеидами. Каждая звезда пересекает область цефеид пять раз. Первое и пятое прохождения совпадают со стадией быстрого сжатия ядра звезды и продолжаются очень недолго — около 2000 лет. Третье и четвертое прохождения длятся дольше — около 100 000 лет. Дольше всех продолжается второе прохождение звезды через область неустойчивости (350 000 лет). Чем больше масса звезды, тем больше и размах ее «качаний» на диаграмме.

Киппенхан изучил проблему устойчивости звезд в области «качаний» и нашел условия, при которых звезда становится неустойчивой и начинает пульсировать, как цефеида.

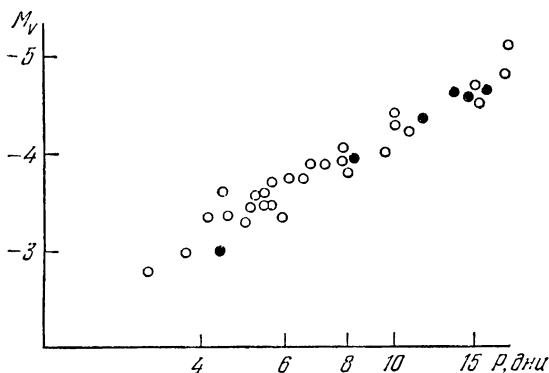


Рис. 19. Периоды пульсаций цефеид (черные кружки — по Киппенхану, белые — по данным наблюдений).

Например, для звезды с массой $7 M_{\odot}$ неустойчивость наступает при температуре поверхности звезды 5300°K . Путем теоретических расчетов Киппенхан определил периоды пульсаций модельных звезд и сравнил свои результаты с хорошо известной из наблюдений зависимостью «период — светимость» для цефеид (см. стр. 99). Согласие получилось удивительным (рис. 19). Таким образом, удалось не только проследить ход эволюции звезд большой массы до стадии красного гиганта, но и связать полученную картину с вопросом о происхождении цефеид. Впрочем, о цефеидах мы подробнее расскажем в главе II.

Конечно, еще далеко не все выяснено в путях звездной эволюции. Как показала немецкая исследовательница

Э. Хоффмейстер, характер «качаний» и «петель» на эволюционных треках звезд во многом зависит от их химического состава и от закона поглощения излучения веществом звезды. Существуют специфические трудности в расчете эволюции звезд средней массы (от $1,3$ до $3 M_{\odot}$). Наконец, лишь совсем недавно удалось проследить последнюю стадию эволюции звезд с любыми массами: от состояния красного гиганта до белого карлика. Раньше, в 1955—1965 гг., этот переход рисовался лишь схематически. Как он рисуется теперь, мы узнаем немного дальше.

А пока оглянемся на путь, пройденный теорией эволюции звезд более чем за столетие. Первые робкие попытки решить вопрос об источниках энергии Солнца: гипотезы Майера и Гельмгольца. Полувековое (хотя и не совсем заслуженное) господство теории гравитационного сжатия Гельмгольца — Кельвина. Одновременно с ним — накопление сведений о звездных спектрах и первые попытки подойти к проблеме звездной эволюции на основе их анализа. Открытие радиоактивности и ядерных превращений и попытки объяснить этими явлениями пополнение энергии Солнца и звезд. Спор двух титанов, Джинса и Эддингтона, об источниках энергии звезд и о шкале времени звездной эволюции. Построение диаграммы Герцшпрунга — Рассела и первые попытки ее эволюционного истолкования. Построение теории внутреннего строения звезд: работы Лейна, Риттера, Эмдена, наконец, Эддингтона. Открытие подлинного источника энергии звезд — термоядерных реакций. Первые расчеты звездной эволюции для однородных моделей звезд. Цепь открытий в области звездной астрономии, значительно прояснивших картину для теоретиков. Большая серия машинных расчетов хода эволюции звезд различной массы от периода гравитационного сжатия до прихода звезды на главную последовательность и затем от нее через пробел Герцшпрунга до стадии красного гиганта. Наконец, расчеты последней стадии в жизни звезды — до состояния белого карлика и некоторых других состояний, о которых мы будем иметь возможность рассказать в других главах этой книги.

Что и говорить, — путь большой, трудный. И без гипотез на этом пути обойтись было невозможно — в этом академик В. А. Амбарцумян был совершенно прав. Но гипотезы всегда терпели поражение, когда не были подкреплены наблюдательными фактами и теоретическими расчетами, а

иногда и данными экспериментов в лаборатории (вспомните термоядерные реакции). Лишь в союзе с этими могущественными путями познания гипотезы приносили пользу, помогали раскрывать истину.

Конец пути

Как же заканчивается жизненный путь звезды? Если вначале существовало наивное представление о том, что каждая звезда, исчерпав свои энергетические ресурсы, «просто остывает», то уже в 20-е годы у Рессела возникло представление, что конечный этап жизни звезды — стадия белого карлика. Это представление прошло через столетия поисков, и каждый раз попытки как-то обосновать его встречали большие трудности. Даже машинные расчеты М. Шварцшильда, Киппенхана, Масевич, в каждом из которых рассчитывалось по 600—800 моделей, не доводили звезду до стадии белого карлика. Трудность состояла не столько в быстрой изменении состояния звезды, сколько в том, что с изменением этого состояния приходится принимать во внимание новые законы природы — законы поведения вырожденного газа при сверхвысоких плотностях с учетом эффектов общей теории относительности. Уравнения, описывающие превращение звезды в белый карлик, усложняются настолько, что их решение не под силу даже электронно-вычислительным машинам.

Но конечное состояние звезды рассчитать можно. И попытки это сделать предпринимались еще в конце двадцатых — начале тридцатых годов.

Вспомним вкратце основное, что известно астрономам о природе белых карликов. Это звезды с массами от одной до 0,2 солнечной, но с очень малыми размерами и чудовищной плотностью.

Первый белый карлик — спутник Сириуса — был обнаружен по отклонениям в движении Сириуса, которые он создавал своим притяжением. Вывод о том, что у Сириуса есть слабый, невидимый спутник, сделал еще Ф. Бессель в 1844 г. на основании обработки своих наблюдений за 1834—1840 гг. Лишь в 1862 г. А. Кларк, известный оптик, испытывая изготовленный им объектив нового телескопа обсерватории университета в Миссисипи, заметил вблизи Сириуса звездочку 7-й величины, такого же цвета, как и сам Сириус. Оказалось, что светимость спутника в 3000 раз меньше, чем у Сириуса, диаметр — в 55 раз, но масса была

только в 2,5 раза меньше массы главной звезды. Таким образом, средняя плотность спутника Сириуса составляла $4 \cdot 10^4 \text{ г/см}^3$.

В 1896 г. был открыт второй белый карлик — спутник Проциона (также предсказанный Бесселем), за следующие 40 лет — еще три. Но потом число открываемых белых карликов начало быстро расти. Этому в немалой степени способствовало применение новых методов их обнаружения. По специальной программе, разработанной американским астрономом В. Лейтенем, на 48-дюймовом телескопе Шмидта обсерватории Маунт Паломар фотографируются участки неба, один за другим. Путем сравнения положений звезд на снимках, разделенных интервалом в несколько лет, отбираются звезды с большими собственными движениями (т. е. близкие к нам). Они подвергаются более тщательному анализу, в частности, исследуются их спектры. По спектрам и выявляются белые карлики.

Уже к 1953 г. было зарегистрировано 267 белых карликов, а дальше их стали открывать по сотне и более в год. В 1970 г. В. Лейтен опубликовал сводный каталог, в котором содержится 2934 объекта.

Но точные значения физических характеристик (масс, радиусов, светимостей, температур, плотностей) были известны лишь для немногих белых карликов, входивших в двойные системы. Их массы определялись по III закону Кеплера, светимости — из сравнений с главной звездой. По светимости и цвету (а значит, температуре) нетрудно было вычислить радиус звезды, по радиусу и массе — плотность.

Увы, тех немногих белых карликов, которые, подобно спутникам Сириуса и Проциона, были составляющими двойных звезд, явно не хватало для статистики и анализа их положения на Г—Р-диаграмме. Астрономы пошли на хитрости. Были изучены белые карлики, входившие в рассеянные звездные скопления. Прежде всего надо было убедиться, что это действительно члены скопления, а не звезды фона, случайно проектирующиеся на скопление. Это удалось сделать путем сравнения собственных движений. Поскольку расстояния до скоплений были хорошо известны (по входившим в них цефеидам), не представляло труда найти светимости, а значит, и радиусы входивших в них белых карликов.

Сложнее было с массами. Но тут на помощь астрономам пришла общая теория относительности. Одним из эффектов,

вытекавших из этой теории и предсказанных еще в 1916 г. А. Эйнштейном, было гравитационное красное смещение. Суть этого явления состояла в том, что если источник световых колебаний находится в сильном поле тяготения, частота этих колебаний должна уменьшиться против нормальной, иначе говоря, все спектральные линии должны сместиться к красному концу (чем и объясняется название эффекта). По величине смещения можно определить ускорение силы тяжести у поверхности звезды, а зная ее радиус, — найти ее массу. Этим методом были определены массы нескольких десятков близких к нам белых карликов, после чего они были нанесены на Г — Р-диаграмму.

Белые карлики — наименьшие из известных нам звезд, если судить по их размерам. Их диаметры измеряются от 50 000 км (спутник Сириуса) до 1400 км (звезда Вольф 457). Средние плотности этих звезд заключены в пределах $4 \cdot 10^4$ — $7 \cdot 10^8$ г/см³. Разумеется, центральные плотности у белых карликов гораздо больше и могут достигать 10^{10} г/см³.

Как мы уже говорили выше (стр. 78), при таких чудовищных плотностях газ находится в вырожденном состоянии: атомные ядра полностью лишены электронных оболочек и «упакованы» довольно плотно. В свою очередь, электроны расположены так близко друг от друга, что на состоянии электронного газа заметно сказывается влияние тождественности электронов. Свойства такого вырожденного электронного газа были детально изучены в 1926 г. замечательным итальянским физиком Энрико Ферми. Законы квантовой механики накладывают на системы, состоящие из электронов (например, на электронные оболочки в атоме), строгий запрет: в одном и том же квантовом состоянии не может быть одновременно больше одного электрона. Вырожденный электронный газ тоже можно считать подобной системой, в которой электроны заполняют каждый свое состояние, подобно тому как пчелиные яички откладываются каждое в отдельную соту. Электронов в газе Ферми очень много, но их число конечно. Каждый электрон имеет определенный импульс. Если известен объем, занимаемый газом, и число электронов в нем, то можно подсчитать некоторый граничный импульс p_0 такой, что импульсы всех электронов расположатся через строго определенные (но не равные друг другу) интервалы от нуля до p_0 .

Граничному импульсу p_0 соответствует и некоторая граничная энергия ϵ_0 . Условие вырождения принято считать выполненным, если средняя кинетическая энергия

электронов, соответствующая температуре газа T , много меньше энергии ϵ_0 . Такой вырожденный газ называют холодным, хотя по другим признакам его можно назвать горячим. Так, при плотности 10^6 г/см^3 газ с температурой меньше 10^9 градусов уже можно считать «холодным»!

В том же 1926 г. английский астрофизик У. Фаулер обратил внимание на то, что в недрах звезды, состоящей из холодного вырожденного газа, давление такого газа способно уравновесить наружное давление, вызванное тяготением. Таким образом, звезда типа белого карлика может быть устойчивой. Спустя два года к аналогичному выводу пришел известный советский физик Я. И. Френкель.

Но при всех ли значениях массы звезда будет устойчивой? Такой вопрос поставил и решил в 1932 г. замечательный советский физик, впоследствии академик, Л. Д. Ландау, которому тогда было всего 25 лет. Анализ проблемы устойчивости большой массы холодного вырожденного газа привел его к выводу, что существует некоторая предельная, критическая масса. Пока масса холодной звезды не достигла этого предела, она будет сохранять устойчивость. Но если масса больше критической, давление электронного газа не сможет противостоять силам тяготения и звезда испытает катастрофическое сжатие — к о л л а п с. Критическая масса, по расчетам Ландау, примерно равна солнечной.

В 1935 г. индийский астрофизик С. Чандрасекар продолжил анализ Ландау и нашел, что критическая масса, предсказанная советским ученым, равна $1,44 M_{\odot}$. Это — так называемый предел Чандрасекара. Однако в решении Чандрасекара не были учтены две очень важные поправки, связанные с эффектами общей теории относительности и с образованием нейтронов, которое неизбежно происходит при очень высоких плотностях, превышающих 10^{10} г/см^3 . У Чандрасекара получалось, что звезда будет сжиматься беспредельно, так что плотность в центре будет стремиться к бесконечности.

В 1949 г. советский астрофизик С. А. Каплан указал, что введение этих поправок существенно меняет дело: при сжатии звезды с критической массой плотность в центре будет стремиться не к бесконечности, а к конечному пределу, равному $3 \cdot 10^{10} \text{ г/см}^3$. К сожалению, С. А. Каплан опубликовал свою работу в журнале, малоизвестном за рубежом — в «Ученых записках Львовского университета». И вот уже спустя 15 лет, в 1964 г., Чандрасекар независимо получил тот же результат.

Интересно, что радиус звезды, соответствующий пределу Чандрасекара (с поправкой Каплана), равен примерно 1000 км, что близко к значению радиуса самого маленького известного нам белого карлика — звезды Вольф 457.

Учет нейтронизации, т. е. «вдавливания» электронов в атомные ядра с превращением части содержащихся в них протонов в нейтроны, несколько снижает предел Чандрасекара — до $1,2 M_{\odot}$. Большая заслуга в изучении влияния эффектов нейтронизации и общей теории относительности принадлежит астрономам Бюраканской астрофизической обсерватории Г. С. Саакяну, Ю. Л. Вартаняну и другим.

Таким образом, конечная судьба звезд, массы которых заключены в пределах от 0,2 до $1,2 M_{\odot}$, уже в начале 50-х годов представлялась довольно ясно: после исчерпания всех ресурсов термоядерных реакций звезда становится «холодной» и сжимается, превращаясь в белый карлик. При сжатии температура в недрах звезды снова повышается, но термоядерные реакции возобновиться не могут: нет «горючего». Звезда медленно остывает, расходуя энергию теплого движения атомных ядер и электронов. Недра звезды состоят преимущественно из гелия и тяжелых элементов.

Сколько же времени может «прожить» звезда в состоянии белого карлика? Процесс охлаждения такой звезды был изучен в 1950 г. С. А. Капланом и в 1952 г. английским астрофизиком Л. Местелом. Срок жизни для спутника Сириуса получился у Местела $4 \cdot 10^8$ лет, для звезды Вольф 457 — 10^{10} лет. Наименьший срок жизни, 10^7 лет, получился для сравнительно яркого и массивного белого карлика Вольф 1346.

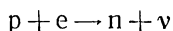
Прежде чем перейти к еще более массивным звездам, скажем несколько слов о судьбе самых маленьких звезд — красных карликов с массами от 0,2 до $0,08 M_{\odot}$. Их эволюцию изучил американский астроном Ш. Кумар. Массы этих звезд слишком малы, чтобы после исчерпания источников энергии они могли испытать катастрофическое сжатие (коллапс). Поэтому белыми карликами они стать не могут. Для них остается тривиальный путь — последняя стадия гравитационного сжатия до тех пор, пока в их недрах не наступит состояние вырождения, после чего температура будет падать, несмотря на рост плотности. Звезда будет оставаться красным карликом, все более охлаждаясь, пока не превратится, по выражению Ш. Кумара, в «черный карлик» и станет невидимой.

Нейтронные звезды и «черные дыры»

Что же будет со звездой, израсходовавшей свои запасы термоядерного топлива, если ее масса превосходит предел Чандрасекара?

Когда Л. Д. Ландау представил к опубликованию свою первую работу по устойчивости холодных звезд, нейтрон еще не был открыт. Это случилось несколькими месяцами позднее. Но уравнения Ландау, в которых рассматривался вырожденный холодный газ, были вполне применимы и к нейтронному газу.

В 1937 г. Л. Д. Ландау вновь вернулся к этой проблеме. За это время в мировой печати уже промелькнули высказывания астрофизиков В. Бааде и Ф. Цвикки о том, что могут существовать нейтронные звезды. Ландау исследовал этот вопрос подробнее. Нейтроны могут образовываться из протонно-электронного газа благодаря реакции



(протон плюс электрон дают нейтрон и нейтрино). Скорость этой реакции зависит от плотности газа. При плотности менее 10^7 г/см^3 число протонов и нейтронов в газе почти одинаково, но при увеличении плотности число нейтронов начинает быстро расти. Ядра с аномально большим числом нейтронов становятся неустойчивыми и распадаются. Наконец, при плотности больше 10^{10} г/см^3 вещество звезды почти целиком состоит из нейтронов. Отсюда Ландау заключил, что после исчерпания источников энергии во внутренних частях звезды с достаточно большой массой (а значит, и плотностью) образуется массивная нейтронная сфера.

Работу Ландау продолжили американские физики Роберт Оппенгеймер (впоследствии один из создателей атомной бомбы) и Г. М. Волков. В 1939 г. они рассчитали точную модель нейтронной звезды с использованием уравнений общей теории относительности. Выяснилось, что при плотности 10^{10} г/см^3 масса звезды, находящейся в равновесии, составляет лишь 0,1 массы Солнца. С ростом плотности растет и равновесная масса звезды, и при плотности 10^{15} г/см^3 она достигает своего максимума, $0,7 M_{\odot}$, после чего снижается примерно до $0,4 M_{\odot}$ с приближением плотности к бесконечности. Но все конфигурации звезды с плотностями в центре больше 10^{15} г/см^3 оказываются неустойчивыми, поэтому данное значение плотности и соответствующая

ей масса получили название предела Ландау — Оппенгеймера — Волкова или сокращенно — предела ЛОВ.

Но если масса нейтронной звезды не может превосходить предел ЛОВ, т. е. $0,7 M_{\odot}$, мы неизбежно приходим к выводу, что такая звезда не сможет образоваться. Если ее масса до выгорания ядерного горючего была меньше предела Чандрасекара ($1,2 M_{\odot}$), то образуется белый карлик — устойчивая конфигурация, которая дальше сжиматься не будет. Если же масса звезды окажется больше предела Чандрасекара, она не сможет остановиться на стадии нейтронной звезды и произойдет коллапс.

На самом деле все будет иначе. Оппенгеймер и Волков в своих расчетах использовали уравнения состояния и де а л ь н о г о вырожденного нейтронного газа, т. е. пренебрегли взаимодействием частиц между собой. Но, как показали спустя 20 лет американские астрофизики А. Камерон (в 1959 г.) и Э. Салпетер (в 1960 г.), при плотностях свыше 10^{11} г/см^3 начинают сказываться ядерные силы притяжения, которые уменьшают давление по сравнению с его значением для идеального газа Ферми. Поэтому предельная масса будет больше, чем получили Оппенгеймер и Волков. Камерон, используя приближенное уравнение состояния реального нейтронного газа, получил предельную массу около $2 M_{\odot}$. В 1964 г. более точные расчеты выполнили советские астрофизики Г. С. Саакян и Ю. Л. Вартанян. Они получили предельную массу $1,55 M_{\odot}$. По-видимому, истинная масса лежит где-то между этими двумя значениями, но определить ее более точно — задача очень трудная, и вот почему. Радиус нейтронной звезды с плотностью в центре $4 \cdot 10^{15} \text{ г/см}^3$ (как получили Саакян и Вартанян) будет всего-навсего 10 км, иначе говоря, она уместилась бы на территории Москвы. Но масса ее — полторы-две солнечных массы, а плотность в центре приближается к предельному значению, при котором уравнения состояния теряют смысл*). Именно это обстоятельство и затрудняет уточнение предельной массы нейтронной звезды.

Но самое главное было выяснено — звезды с массами, промежуточными между пределом Чандрасекара и пределом ЛОВ, т. е. лежащими в интервале $(1,2 \div 2) M_{\odot}$, после исчерпания ядерных источников энергии должны сжаться до размеров порядка 10 км и превратиться в нейтронные звезды.

*) Уже при плотностях более 10^{14} г/см^3 ядерное притяжение сменяется отталкиванием и давление быстро растет.

Более того, Г. С. Саакян и Ю. Л. Вартамян показали, что в центральных частях нейтронной звезды образуется ядро, состоящее из г и п е р о н о в — тяжелых элементарных частиц с массами от 2182 до 2583 масс электрона (протон и нейтрон тяжелее электрона соответственно в 1836 и 1839 раз). Гипероны были открыты впервые в 1947 г. в космических лучах Г. Роучестером и К. Батлером, но лишь в 1951 г. они были получены экспериментально. Эти сверхтяжелые частицы нестабильны и в обычных условиях быстро распадаются на стабильные частицы: протоны (или нейтроны) и пи-мезоны. Время жизни гиперонов — не более 10^{-10} сек. Но в условиях плотностей, приближающихся к ядерным, гипероны могут существовать устойчиво. Г. С. Саакян и Ю. Л. Вартамян изучили возможность существования в сверхплотном ядре шести различных видов гиперонов, обозначаемых символами Ξ^0 , Σ^+ , Ξ^- , Σ^0 , Λ^0 и Σ^- (Ξ , Σ и Λ — прописные греческие буквы «кси», «сигма» и «лямбда», знаки «+» и «-» указывают наличие заряда, 0 — его отсутствие *). Им удалось найти закон изменения числа гиперонов с плотностью и предельный радиус, на котором распадается последний из гиперонов данного типа.

Нейтронные звезды более 30 лет рассматривались только теоретически. И лишь в 1968 г., после открытия пульсаров, ученые поняли, что нейтронные звезды можно наблюдать **).

А сейчас мы должны приоткрыть перед читателем завесу над таинственными «черными дырами», в которые «проваливаются» звезды, имевшие несчастье обладать массой больше предела ЛОВ, т. е. больше двух солнечных масс. Такую звезду ничто не может спасти от катастрофического сжатия — коллапса, предсказанного Л. Д. Ландау еще в 1932 г. Достигнув размеров нейтронной звезды, массивная звезда продолжает сжиматься, пока не сожмется до своего г р а в и т а ц и о н н о г о р а д и у с а. Попробуем объяснить читателю, что это такое.

Еще Карл Шварцшильд в 1916 г., исходя из только что опубликованных уравнений общей теории относительности Эйнштейна, доказал, что для любой звезды или вообще сферического небесного тела существует сфера, обладающая тем свойством, что, если всю массу звезды сжать

*) Впоследствии Г. С. Саакян и его сотрудники рассмотрели возможность образования в сверхплотных звездах гиперонов других типов.

**) См. В. Л. Г и н з б у р г, Пульсары, «Знание», 1970; «Пульсары», сб. статей, «Мир», 1971.

до размеров этой сферы, электромагнитные колебания не смогут покинуть ее, будут как бы замкнуты под действием сил гравитации. Эта сфера получила название сферы Шварцшильда, а ее радиус — гравитационного радиуса. Он равен

$$r_g = \frac{2fM}{c^2},$$

где $f = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{сек}^2$ — постоянная тяготения, $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$ — скорость света, M — масса звезды. Так, например, для Солнца ($M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$) $r_g = 3 \text{ км}$, а для Земли ($M = 6 \cdot 10^{27} \text{ г}$) $r_g = 1 \text{ см}$.

Мы видим, что гравитационный радиус звезды с массой в $2 M_{\odot}$ равен 6 км , что совсем недалеко от предельного радиуса нейтронной звезды. Как только звезда сожмется до своего гравитационного радиуса, ее связь с внешним миром прекратится: электромагнитные волны не смогут преодолеть гравитационный барьер, они будут настолько сильно искривляться в поле тяготения звезды, что будут описывать запутанные кривые, лежащие целиком внутри сферы Шварцшильда. Единственным признаком существования таких звезд будет их притяжение. Советские ученые академик Я. Б. Зельдович и доктор физико-математических наук И. Д. Новиков назвали их застывшими звездами, потому что для внешнего наблюдателя сжатие до гравитационного радиуса продолжается бесконечно долго (звезда для него как бы застывает). Но сейчас большое распространение получило несколько вольное и образное название, которое им дали за рубежом: black holes — «черные дыры». Итак, «черная дыра» — вот конец жизненного пути любой достаточно массивной звезды.

Но, перейдя в состояние «черной дыры», звезда не перестает сжиматься. До какой плотности она при этом может прийти, еще неизвестно. При очень больших плотностях уравнения общей теории относительности не могут описать дальнейший ход событий.

Какое резкое различие судеб у звезд разной массы! Самые маленькие спокойно остывают, мирно доживая свой век. Звезды с массами от $0,2$ до $1,2 M_{\odot}$, исчерпав запасы ядерного топлива, резко сжимаются, превращаясь в белый карлик, и в этом состоянии существуют сотни миллионов и миллиарды лет. Более массивные звезды, от $1,2$ до $2 M_{\odot}$, испытывают еще более резкое сжатие, достигая стадии нейтронной звезды. И, наконец, самые массивные буквально кончают жизнь самоубийством, проваливаясь в результате

коллапса под сферу Шварцшильда и переходя в стадию «черной дыры».

Естественно, астрономы не удовлетворились чисто теоретическими выводами и предприняли ряд попыток обнаружить нейтронные звезды и «черные дыры» путем наблюдений. Быстро вращающиеся нейтронные звезды вскоре обнаружили себя сами — в 1968 г. были открыты п у л ь с а р ы, источники короткопериодических радиосигналов. Их период (секунды или доли секунды) равен периоду вращения звезды. Но еще за три года до открытия пульсаров, в 1965 г., появилась очень важная работа Я. Б. Зельдовича и О. Х. Гусейнова, в которой впервые было указано, что нейтронные звезды и «черные дыры» надо искать в двойных системах. Сейчас поиски этих загадочных тел приняли широкий размах. Азербайджанские астрономы О. Х. Гусейнов и А. Ш. Новрузова опубликовали список 13 наиболее интересных объектов, у которых могут быть невидимые компоненты. В нем особо выделена звезда δ Близнецов, до которой точно известно расстояние (по ее параллаксу). В Шемахинской астрофизической обсерватории ведутся наблюдения этой звезды с целью доказать, что ее невидимый спутник принадлежит к классу «черных дыр». За рубежом идут большие споры вокруг интересной звезды ϵ Возничего, в системе которой американские астрофизики А. Камерон и Т. Стозерс тоже подозревают наличие «черной дыры». Но окончательно доказать это пока никому не удалось.

Вот мы и проследили все этапы жизненного пути звезд. Одновременно мы проследили и все этапы нелегкого пути познания этой интереснейшей проблемы астрофизики. Еще далеко не все ясно ученым. Есть еще не разрешенные вопросы, загадки. До сих пор не удалось получить от Солнца поток нейтрино, которые должны покидать его в ходе термоядерных реакций. В чем тут дело: в недостатках аппаратуры или методики или в ошибочности наших представлений об источниках солнечной энергии? Неужели последнее? Но тогда что же поддерживает энергию Солнца? Снова мы пришли к тому, с чего начали.

Будем надеяться, что наши опасения напрасны. Нейтрино могут претерпевать какие-то изменения «по дороге», вступать в непредвиденные взаимодействия, да мало ли еще что! И тогда разработанная трудами десятков ученых и нарисованная нами картина правильно отражает пути звездной эволюции.

Глава II

НЕОБЫЧНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Пульсирующие звезды

В 1784 г. английский юноша Джон Гудрайк, занявшийся систематическими поисками переменных звезд, обнаружил изменения блеска звезды Дельта в созвездии Цефея. В том же году его друг, такой же любитель астрономии, Эдуард Пиготт открыл аналогичные колебания блеска

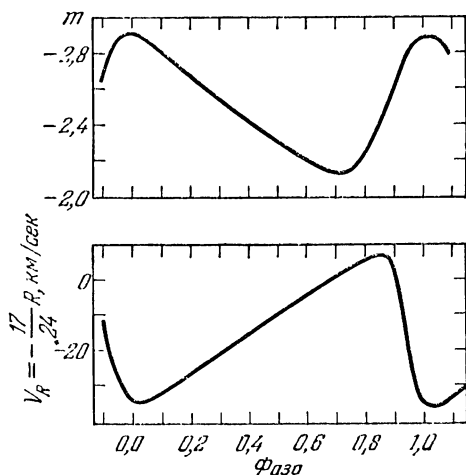


Рис. 20. Кривая блеска δ Цефея (вверху) и кривая изменения ее лучевых скоростей (внизу).

звезды η Орла. Характер этих колебаний был почти одинаков у обеих звезд, но зато резко отличался от изменений блеска Алголя и открытой Гудрайком в том же году β Лирь. Блеск δ Цефея и η Орла изменялся плавно, но увеличение его происходило примерно вдвое быстрее, чем уменьшение (рис. 20). По названию созвездия Цефея, в котором

была открыта первая звезда этого типа, подобные ей переменные звезды стали называться *цефеидами*.

Удивительна судьба Гудрайка. Глухонемой от рождения, он сумел в 18 лет открыть первую короткопериодическую переменную звезду (Алголь), объяснить причины изменения ее блеска, открыть затем переменные звезды β Лиры и δ Цефея. В 19 лет он был награжден за эти открытия золотой медалью Королевского общества (т. е. Академии наук Великобритании), а в 21 год был избран его действительным членом. А через две недели после своего избрания он скончался. Но имя его можно найти в любом учебнике астрономии, в любой книге, где говорится о звездах.

Между тем открытия цефеид продолжались, и к концу XIX в. их было обнаружено около тридцати. Все они отличались строгой периодичностью изменений блеска, периоды их заключались в пределах от 2 до 35 суток.

В конце XIX и в начале XX в. применение фотографии резко изменило наши представления о количестве переменных звезд вообще и цефеид в частности. Ежегодно стали открывать десятки цефеид, причем не только в нашей Галактике, но и в шаровых звездных скоплениях, в Магеллановых Облаках и в других ближайших галактиках. К концу 30-х годов XX в. число открытых цефеид достигло тысячи, а в настоящее время их известно свыше пяти тысяч.

Почему изменяли свой блеск цефеиды? Впервые этот вопрос был поставлен примерно спустя сто лет после их открытия. До этого цефеидам просто не придавали значения. Когда же ученые решили, что пришла пора ответить на вопрос, поставленный в начале абзаца, произошел удивительный и весьма редкий случай в истории научных гипотез.

Обычно (и мы уже привели тому немало примеров), когда хотя бы объяснить какое-то новое и еще непонятное явление, самые первые предлагаемые гипотезы оказываются неверными. Их проверяют — новыми наблюдениями или теорией — и чаще всего отвергают, и только потом, в результате длительных усилий многих ученых, появляется *верная гипотеза*.

С цефеидами все было наоборот. Самая первая гипотеза была верной, а целый ряд последующих (нередко появлявшихся на базе ее критики) оказались неверными. И к старой гипотезе пришлось вернуться (не без боя), а затем усовершенствовать ее, превратить в теорию.

Первую гипотезу, объясняющую возможность изменения блеска звезд их периодическими пульсациями, предложил

в 1879 г. уже известный нам теоретик в области внутреннего строения звезд А. Риттер. В серии своих публикаций (см. стр. 32) он доказал, что при известных условиях звезда может начать пульсировать. Пульсация происходит а д и а б а т и ч е с к и (т. е. без затраты или притока тепла), одновременно во всей массе звезды и гомогенно, т. е. каждый объем звезды расширяется или сужается в одинаковом отношении. Риттер вывел и основные уравнения, описывающие процесс подобной пульсации.

Интересно, что в своей работе Риттер исходил вовсе не из необходимости объяснить причину переменности цефеид (тогда и слова-то такого не было), а из теоретического анализа внутреннего строения звезд.

Его работа прошла незамеченной. Астрономы-наблюдатели не читали журнал «Wiedemann Annalen», где публиковал свои статьи Риттер, а физики-теоретики ничего не знали о цефеидах. О работе Риттера вспомнили лишь много лет спустя.

В 1894 г. астрофизик Пулковской обсерватории А. А. Белопольский, искусный спектроскопист, обработав спектральные наблюдения δ Цефея и η Орла, обнаружил периодическое изменение лучевых скоростей обеих звезд. Изменение происходило синхронно с изменением блеска (рис. 20). Кривая лучевых скоростей напоминала зеркально отраженную кривую блеска. Это означало, что момент максимума блеска совпадает с наибольшей скоростью приближения звезды к нам.

А. А. Белопольский объяснил это явление обращением звезды по эллиптической орбите вокруг более слабой компоненты, спектр которой не обнаруживается. Он даже вычислил элементы эллиптической орбиты для десятка изученных им цефеид. Сделать это было сравнительно нетрудно по кривой лучевых скоростей — дело в том, что при некоторой ориентировке и размерах орбиты можно получить такие же кривые лучевых скоростей, какие давали наблюдения.

Труднее было объяснить причину столь же регулярных колебаний блеска. Белопольский понимал, что их нельзя объяснить затмением, как в случае Алголя или изученной им же β Лиры. Он сделал предположение, что изменение блеска происходит потому, что звезда имеет на поверхности более светлые и более темные места, причем она обращена к своему невидимому спутнику одной стороной.

В своей докторской диссертации, озаглавленной «Исследование спектра переменной звезды δ Цефея», А. А. Бело-

польский высказал именно это предположение. Диссертация была закончена и опубликована в 1895 г., но ее защита состоялась уже в 1896 г. Первый оппонент, директор Московской обсерватории В. К. Цераский отметил тщательность выполнения и обработки наблюдений δ Цефея, использование нового метода, основанного на практическом применении принципа Доплера — Физо в астрономии, многие интересные дополнительные результаты, полученные А. А. Белопольским из анализа лучевых скоростей звезд (он впервые вычислил из этих наблюдений среднюю скорость движения Земли вокруг Солнца и солнечный параллакс).

Вторым оппонентом был крупный русский физик, профессор Н. А. Умов. Выйдя на трибуну, он сказал:

— Я также почту своим приятным долгом отметить здесь тщательность, даже скрупулезность выполнения г-ном Белопольским спектральных наблюдений этой звезды и их последующей обработки. Однако я никак не могу согласиться с тем объяснением, которое автор диссертации дает наблюдаемым явлениям. Совершенно непонятно, какие причины могут придать одним местам звезды большую, а другим — меньшую яркость. Мне представляется, что причину одновременного изменения яркости звезды и смещения линий в ее спектре следует искать в другом явлении — в периодической пульсации звезды.

Так пульсационная гипотеза была предложена вторично, причем на этот раз в прямом приложении к цефеидам. И снова ей не повезло. Ни Умов, ни кто-либо другой не взялся за ее разработку. Белопольский тоже не принял этой точки зрения и по-прежнему рассматривал цефеиды как тесные двойные системы. Он продолжал собирать наблюдательный материал. В 1896 и 1899 гг. он опубликовал свои исследования η Орла и ζ Близнецов, затем вновь вернулся к изучению δ Цефея. В 1912 г. он заподозрил наличие изменений интенсивности линий поглощения в ее спектре. Спустя год сотрудница Белопольского П. Н. Леман подтвердила этот факт, означавший, что температура поверхности звезды изменяется с тем же периодом, причем максимальная температура совпадает по времени с максимумом блеска.

Тогда же, в 1912 г., было сделано еще одно важное открытие, связанное с цефеидами. Сотрудница Гарвардской обсерватории мисс Генриетта Ливитт обнаружила, что периоды цефеид в Малом Магеллановом Облаке связаны простой степенной зависимостью с их блеском (максималь-

ным и минимальным). Чем больше блеск звезды, тем больше у нее период. Но Магеллановы Облака настолько удалены от нас, что различием расстояний до находящихся в них цефеид можно пренебречь. Поэтому мисс Ливитт сделала правильный вывод, что период изменения блеска цефеид связан с их светимостью. Но это соотношение можно было распространить и на цефеиды нашей Галактики. Это было сделано датским астрономом Эйнаром Герцшпрунгом (одним из авторов Г — Р-диаграммы) и американским астрономом, директором Гарвардской обсерватории Харлоу Шепли, который прокалибровал зависимость «период — светимость» у цефеид и установил ее нуль-пункт. С тех пор эта зависимость стала мощным средством определения расстояний до других звездных систем: рассеянных и шаровых звездных скоплений и далеких галактик.

Еще в 1895 г. астроном той же Гарвардской обсерватории С. Бейли обнаружил несколько цефеид с очень коротким периодом в шаровом звездном скоплении ω Центавра. Вскоре они были обнаружены и в других шаровых скоплениях, а также в нашей Галактике. Сейчас их известно около четырех тысяч, из них две трети принадлежат нашей Галактике. Периоды изменения блеска у этих звезд (их принято называть звездами типа RR Лиры по имени звездочки 8-й величины, открытой в 1899 г.) заключены в пределах от 88 минут (!) до 40 часов. Помимо краткости периода, звезды типа RR Лиры отличаются от «классических» цефеид формой кривой блеска, пространственным распределением в Галактике и еще тем, что их светимость практически одинакова и не зависит от периода. Это, однако, не только не мешает, но облегчает использование звезд типа RR Лиры для определения расстояний, так как не надо знать точной величины периода, а лишь убедиться в том, что данная звезда принадлежит к этому типу.

Вернемся, однако, к проблеме объяснения переменности цефеид. На протяжении почти двадцати лет астрономы и физики пытались решить эту проблему, исходя из гипотезы тесных двойных звезд. В 1900 г. Карл Шварцшильд обнаружил на основе фотометрических наблюдений в разных участках спектра, что цефеиды изменяют свой цвет, а значит, и температуру (этот результат был, как мы помним, вскоре подтвержден работами А. А. Белопольского и И. Н. Леман). Отсюда он сделал вывод, что причиной изменения блеска цефеиды является изменение ее температуры. Эдди полагал, что последнее вызывается приливами,

возбуждаемыми в яркой звезде ее темным спутником при приближении к периастру. Робертс считал, что в периастре спутник сам становился видимым благодаря отражению им света главной звезды. Х. Кэртис предложил гипотезу о сопротивляющейся среде, которая разогревает переднюю полусферу звезды при ее ускоренном движении вблизи периастра. Дункан, поддерживая эту идею, усложнял ее введением предположения о том, что атмосфера главной звезды имеет переменную поглощательную способность.

Искусственность всех этих гипотез была очевидна. Установление связи изменений радиальных скоростей и температур с колебаниями блеска, с одной стороны, и открытие зависимости «период — светимость», с другой, подготовили почву для нового, третьего по счету выдвижения пульсационной гипотезы. Оно было сделано в 1913 г. английским астрономом Г. Пламмером и годом позже — Х. Шепли.

Х. Шепли обратил внимание на большую светимость цефеид, в 100—10 000 раз превосходящую светимость Солнца. Учитывая, что они в основном принадлежали к спектральным классам F и G, Шепли подсчитал, что их радиусы должны равняться примерно $(25 \div 30)R_{\odot}$. Но если считать эти звезды спектрально-двойными, то получалось, что большие полуоси их орбит должны были быть в 10 раз меньше радиусов самих звезд! Другое, очень сильное возражение против гипотезы Кэртиса привел уже в 1922 г. голландский астроном А. Паннекук: в случае движения в сопротивляющейся среде периоды цефеид должны постепенно изменяться, что противоречило наблюдениям.

Шепли, перечислив трудности гипотезы двойственности цефеид, советовал окончательно от нее отказаться и принять пульсационную гипотезу. Однако он сам подчеркнул ее неопределенность, связанную с недостатком имевшихся к тому времени знаний о внутреннем строении звезд. Ни Шепли, ни Пламмер не попытались дать математической теории пульсаций.

За физико-математическую разработку пульсационной гипотезы взялся, начиная с 1917 г., А. Эддингтон. В своей первой статье он подверг проблему пульсаций всестороннему анализу и тогда же обратил внимание на то, что процесс пульсаций должен поддерживаться за счет затраты какой-то энергии. Самопроизвольные пульсации, которые могли бы возникнуть из-за отсутствия равновесия между

давлением внешних слоев и суммой газового и лучистого давления, должны сравнительно быстро затухать.

Рассмотрим процесс пульсаций по Эддингтону. Пусть давление внешних слоев в некоторый момент окажется больше внутреннего давления (под ним мы будем подразумевать сумму газового и лучистого давления). Звезда начнет сжиматься. Но от сжатия недра звезды разогреваются. При более высокой температуре давление газа возрастает (оно пропорционально температуре), увеличивается и давление излучения. Внутреннее давление теперь превосходит внешнее, и звезда начинает расширяться. Но при расширении температура падает, значит, уменьшается и внутреннее давление, внешнее снова начинает преобладать, и весь процесс повторяется.

В общем случае пульсацию звезды можно описать двумя дифференциальными уравнениями второго порядка, из которых одно описывает изменение расстояния каждой частицы звезды от ее центра, а второе — изменение энергии, приходящейся на единицу массы. Решить эту систему в общем виде было невозможно. Эддингтон, как и до него Риттер, ввел существенное упрощение: он предположил, что пульсация происходит без отдачи энергии, т. е. адиабатически. Это позволило избавиться от второго уравнения. Кроме того, сразу можно было положить, что давление $p \sim \rho^\gamma$ (ρ — плотность, γ — показатель адиабаты). Но, в отличие от Риттера, рассматривавшего однородную модель звезды, Эддингтон использовал свою стандартную модель, развитую им при разработке теории внутреннего строения звезд. Задав распределение плотности внутри звезды, он решил уравнение пульсации и, что самое важное, получил зависимость периода P от средней плотности звезды ρ , прекрасно согласующуюся с тем, что давали наблюдения. Она имеет вид $P^2\rho = \text{const}$. В другой работе Эддингтон показал, что наблюдаемая асимметрия кривых блеска и лучевых скоростей может быть получена как следствие его теории.

Успех теории был вне сомнений. Но оставалось еще много неясностей. Прежде всего, блеск звезды определяется температурой ее поверхности (фотосферы), а не внутренних слоев, тогда как пульсации зарождаются именно в недрах звезды. Кривая лучевых скоростей относится к еще более наружным слоям — к хромосфере звезды, потому что именно в ней образуются наблюдаемые нами линии поглощения.

Вторая трудность состояла в том, что максимальный блеск звезды не соответствовал по времени наибольшему сжатию, как, казалось бы, должно было быть, а отставал от него на четверть периода, но зато совпадал с наибольшей скоростью расширения звезды.

Правда, во второй своей работе Эддингтон показал, что рассеяние (диссипация) энергии в поверхностных слоях звезды, происходящее за счет процессов теплопроводности и излучения, должно привести к запаздыванию максимального блеска против момента наибольшего сжатия, но не на четверть периода, а гораздо меньше.

Теория Эддингтона была признана большинством ученых. Но, конечно, у нее нашлись и критики, и противники. И первым среди них был... ну, конечно, же, постоянный оппонент Эддингтона, Дж. Джинс. В 1926 г. он выдвинул пять возражений против теории Эддингтона. Вот эти возражения:

1. Уже описанное запаздывание максимального блеска на четверть периода против стадии наибольшего сжатия.

2. Асимметричная форма кривой блеска (согласно теории адиабатических пульсаций она должна быть симметричной).

3. Внутреннее трение должно постепенно тормозить пульсации, и звезда не сможет пульсировать более 100 000 лет. Но это — слишком короткий срок, чтобы объяснить сравнительное обилие цефеид.

4. Количество цефеид должно возрасти с уменьшением амплитуды изменения их блеска (малые пульсации более вероятны, чем большие), но наблюдения этого не подтверждали.

5. У газовых шаров должны появляться вторичные колебания радиуса, несоизмеримые с периодом основной пульсации, но в действительности у цефеид происходит лишь одно колебание со строго определенным периодом.

Эддингтон принял вызов. В 1928 г. он смог доказать, что если в недрах звезд действует некий механизм, поддерживающий пульсацию, то возражения 3 и 5 устраняются. Эддингтон подсчитал, что энергия, необходимая для поддержания пульсаций, невелика сравнительно с энергией излучения звезды, составляя лишь доли процента общего расхода энергии. Так, для поддержания пульсаций самой δ Цефея нужно всего $0,5 \text{ эрг/г} \cdot \text{сек}$, тогда как за счет излучения эта звезда тратит $160 \text{ эрг/г} \cdot \text{сек}$. Наличие подобного механизма (который пока оставался неизвестным) устраняло и возможность возникновения самопроизвольных

побочных пульсаций, так как они были бы быстро подавлены основным процессом.

Что касается возражений 1 и 2, то тут, как это ни странно, сами трудности пульсационной теории обернулись в ее защиту, поскольку наблюдаемые нами изменения блеска и лучевых скоростей связаны с явлениями, происходящими на разных уровнях (в фотосфере и хромосфере звезды), и «не обязаны» в точности повторять развитие процесса пульсации звездных недр. Но, разумеется, этих качественных соображений было недостаточно. Требовалась строгая математическая теория всего наблюдаемого комплекса явлений.

Оставалось возражение 4, но и оно было устранено в 30-х годах благодаря исследованиям Х. Шепли, Г. ван Гента, П. П. Паренаго и Б. В. Кукаркина, которые по различному материалу доказали, что как в нашей Галактике, так и в Магеллановых Облаках число цефеид быстро возрастает с уменьшением амплитуды изменений блеска.

Однако Джинс не ограничился критикой теории Эддингтона. Он выдвинул свою собственную гипотезу, объяснявшую природу цефеид. Как мы уже знаем (стр. 44), Джинс считал, что недра звезд по своим физическим свойствам подобны жидкости. И вот он предположил, что цефеиды — это звезды, находящиеся в процессе деления. Теорию этого процесса разработали еще в 1885—1887 гг. известный французский математик и механик А. Пуанкаре и английский геофизик и космогонист Дж. Дарвин (сын Чарльза Дарвина). Согласно этой теории, вращающееся жидкое тело может при определенных условиях принять сперва форму эллипсоида вращения, затем трехосного эллипсоида и, наконец, грушевидной фигуры, получившей название «фигуры Пуанкаре» (рис. 21). Эта фигура в дальнейшем может разорваться на две части. Именно так представлял себе Дж. Дарвин (а за ним и Джинс) процесс образования тесных двойных звезд.

Цефеиды Джинс рассматривал как звезды с жидким ядром, имеющим форму фигуры Пуанкаре и окруженным газообразной почти шаровидной оболочкой. Фигура Пуанкаре неустойчива и испытывает колебания вдоль продольной оси, то удлиняясь, то сокращаясь. Сочетание вращения

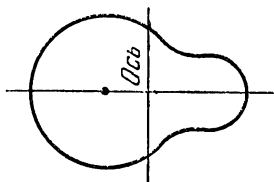


Рис. 21. Фигура Пуанкаре.

звезды и продольных колебаний должно было объяснять наблюдаемые явления.

Джинс еще в 1930 г. считал свою гипотезу перспективной и «обещающей», хотя над ней уже нависли тучи решительных возражений. Во-первых, эта гипотеза требовала столь больших скоростей вращения, что наблюдалось бы заметное расширение линий в спектре. Но цефеиды как раз отличаются узкими, резкими линиями. Если же предположить, что вращается только грушеобразное ядро, а оболочка в этом вращении не участвует (или вращается медленнее), то придется в очень важное соотношение между периодом и средней плотностью звезды ($P\sqrt{\rho} = 0,12$, где P выражено в сутках) подставлять плотность жидкого ядра, что приведет к нереальным значениям периодов. Во-вторых, гипотезе Джинса противоречили результаты, полученные в ходе успешного развития теории внутреннего строения звезд, и, в частности, доказанный еще в 1924 г. А. Эддингтоном факт, что вещество звездных недр практически при любых плотностях сохраняет свойства идеального газа из-за прогрессирующей ионизации атомов.

Несмотря на ряд попыток «исправить» и дополнить гипотезы, рассматривавшие цефеиды как делящиеся или только что разделившиеся звезды (последняя такая попытка была сделана Ф. Хойлом и Р. Литтлтоном в 1943 г.), эти гипотезы были обречены. Но и пульсационная теория требовала опытного подтверждения и теоретической доработки.

Простой и остроумный метод проверки пульсационной гипотезы предложил в 1926 г. (т. е. в разгар дискуссии между Джинсом и Эддингтоном) В. Бааде. Допустим, что мы сможем провести тщательные наблюдения какой-нибудь цефеиды так, чтобы для каждого момента нам были известны ее блеск, лучевая скорость и температура (определенная по цвету или по спектру). Тогда по измерениям температуры можно найти, как изменяется светимость единицы поверхности звезды, а по блеску и расстоянию — как изменяется ее полная светимость. Поделив второе на первое, мы получим ход изменения площади диска звезды, а значит, и ее радиуса. Но то же самое, т. е. кривую изменения радиуса, можно построить по кривой лучевых скоростей. Если изменения блеска звезды вызваны ее пульсацией, то обе кривые должны совпасть.

Правда, тут была одна тонкость, связанная с тем, что звезда не диск, а шар и имеет потемнение к краю, но расчеты

показали, что незнание точного закона потемнения к краю может исказить результат лишь на 5—6%.

Первую, и притом удачную, попытку применить критерий Бааде сделали молодые советские астрономы Б. В. Окунев и Д. О. Мохнач в 1928 г. Они сравнили ход колебаний температуры, определенной самим Б. В. Окуневым для 36 цефеид, а также рядом других наблюдателей, с тем, что

давало использование кривых блеска и лучевых скоростей. Проверка подтвердила пульсационную гипотезу. Но, хотя Окунев и Мохнач опубликовали свою работу в популярном среди астрономов того времени журнале «Astronomische Nachrichten», она не привлекла внимания зарубежных астрономов. В это же время немецкий астроном К. Боттингер тоже предпринял проверку методом Бааде и... получил отрицательный результат. Только в 40-х годах три астронома (В. Беккер, А. Весселинк и ван Хуф) независимо применили критерий Бааде и пришли к общему выводу: гипотеза пульсаций верна.

Другой метод, основанный на теоретическом построении кривой блеска по кривой лучевых скоростей и уравниению изменения светимости звезды при адиабатических пульсациях, предложил и применил в 1938 г. М. Шварцшильд. Он также получил прекрасное согласие с наблюдениями (рис. 22).

От гипотезы к теории

Итак, гипотеза пульсаций получила подтверждение. Но теория пульсаций нуждалась в доработке. И основные направления ее указал опять-таки Артур Эддингтон, занимавшийся этой проблемой почти до конца своих дней *).

Какой механизм мог поддерживать пульсации? Эддингтон еще в 1926 г. указал два возможных механизма. Первый

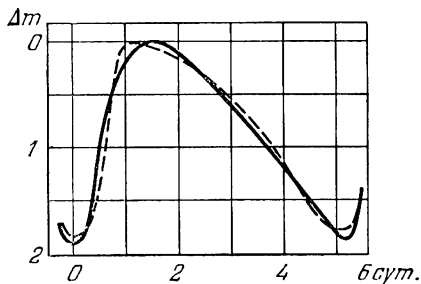


Рис. 22. Сравнение теоретической кривой блеска цефеид (штриховая линия) с наблюдениями (сплошная линия) (по М. Шварцшильду).

*) Л. Эддингтон умер в 1944 г.

из них состоит в том, что при сжатии звезды повышение температуры приводит к усилению интенсивности ядерных реакций, а значит, и выделения энергии *). От этого звезда расширяется, но падение температуры ослабляет ядерные процессы, выделение энергии падает, звезда охлаждается и начинает сжиматься, после чего все повторяется. Короче говоря, ход явлений несколько напоминает то, что происходит в обычном дизеле, поэтому этот механизм можно назвать «дизель-механизмом».

Второй механизм, предложенный Эддингтоном и получивший название «клапанного механизма», основан на том, что вещество звезды может изменять свою способность пропускать поток энергии в зависимости от плотности и температуры: во время сжатия непрозрачность вещества звезды увеличивается (например, от увеличения плотности), а при расширении уменьшается.

Исследования английского астрофизика Т. Каулинга и других ученых в 1934—1935 гг. показали, что дизель-механизм в звездных условиях неэффективен для поддержания пульсаций. Дело в том, что в адиабатических и близких к ним неадиабатических моделях относительная амплитуда колебаний r а с т е т от центра к периферии звезды (а не одинакова, как полагал в свое время А. Риттер). Изменение интенсивности ядерной энергии близ центра сможет породить лишь пульсации малой амплитуды, которые не будут в состоянии поддержать наблюдаемые пульсации внешних слоев,— для этого пришлось бы допустить, что выход энергии пропорционален не двадцатой степени температуры, как в углеродно-азотном цикле, а пятисотой и даже тысячной! Увы, физика не знает таких процессов.

Клапанный механизм Эддингтон охарактеризовал как «фантастический для обычной машины, но не обязательно фантастический для звезды». Что же могло служить клапаном, регулирующим поток энергии в недрах звезды? В 1941 г. Эддингтон как будто нашел ответ на этот вопрос. Таким клапаном могла служить з о н а и о н и з а ц и и в о д о р о д а на периферии звезды. Процесс ионизации требует большой затраты энергии излучения, он увеличивает непрозрачность вещества, поток энергии уменьшается. Но тогда часть ионов рекомбинирует с электронами, степень иониза-

*) Хотя Эддингтон в 1926 г. не знал еще, какие именно ядерные процессы служат источником энергии звезд, он уже тогда предполагал, что их интенсивность зависит от температуры (см. стр. 21).

ции, а значит, и непрозрачность уменьшаются, поток энергии возрастает и т. д.

Но Эддингтон не был последовательным в своем анализе. Он почему-то не доверял эффективности клапанного механизма, считая, что для этого условия в звезде должны сильно отличаться от предполагаемых, и продолжал поддерживать дизель-механизм.

Между тем в разработке теории звездных пульсаций приняла участие целая плеяда ученых. Среди них были и бельгийский астрофизик П. Леду, и норвежский астрофизик С. Росселанд, и советские астрофизики А. Б. Северный, Л. Э. Гуревич и А. И. Лебединский. В частности, Свен Росселанд опубликовал в 1949 г. большую монографию «Теория пульсаций переменных звезд», в которой обобщил исследования Эддингтона и его последователей, а также свои собственные. Росселанд, как и Эддингтон, исходил из центральной теории пульсаций, т. е. считал, что они возбуждаются где-то вблизи центра звезды. Но Росселанд не стал изучать конкретный физический механизм возбуждения пульсаций, а лишь подверг тщательному анализу чисто динамические последствия этого механизма. Основной факт, требовавший объяснения, — запаздывание максимума блеска на четверть периода — остался необъясненным.

В 1946 г. А. Б. Северный попытался объяснить этот факт тем, что цефеиды имеют чрезвычайно протяженную атмосферу, в которой и образуются спектральные линии. Возмущению нужно затратить четверть периода, чтобы дойти до этого уровня. Но такая гипотеза не объясняла, почему на это требуется именно *ч е т в е р т ь* периода, а не больше и не меньше, а главное, при этом получалось бы отставание кривой лучевых скоростей от кривой блеска, а не наоборот, как это наблюдается у цефеид *).

В 1949 г. проблему попытались решить ленинградские астрофизики А. И. Лебединский и Л. Э. Гуревич. Они сразу указали на ошибку Эддингтона, отрицавшего возможность клапанного механизма в условиях, царящих в звездах. Эддингтон, сам разработавший теорию лучистого равновесия в звездных атмосферах, не учел того, что наружные слои пульсирующей звезды как раз могут находиться в лучистом равновесии, а тогда температура при сжатии

*) Такое противоположное по знаку запаздывание наблюдается у долгопериодических переменных звезд типа Миры Кита.

повышается меньше, чем в адиабатическом процессе, и коэффициент непрозрачности определяется в основном изменениями плотности газа.

Гуревич и Лебединский построили двуслойную модель звезды, в которой наружные слои находятся в лучистом равновесии, а внутренние испытывают адиабатические колебания. Наружный слой, определяющий блеск звезды, получает энергию за счет пульсаций внутреннего, причем если амплитуда колебаний убывает с глубиной, то оба слоя сжимаются и расширяются одновременно, если же с глубиной амплитуда колебаний растет, то при сжатии внутреннего слоя наружный расширяется, и наоборот. В первом случае наибольший блеск наступит в момент максимальной скорости сжатия внешнего (и внутреннего) слоя — этот случай соответствует долгопериодическим переменным типа Миры Кита. Во втором случае максимум блеска совпадет с наибольшей скоростью расширения и я наружного слоя (так как внутренних в это время сжимается) — это и есть случай цефеид.

Главным недостатком работы Гуревича и Лебединского было то, что распределение амплитуды колебаний вдоль радиуса звезды они задавали заранее: сначала, как уже говорилось, эта амплитуда растет с глубиной, потом остается почти постоянной, а потом убывает, так как в центре звезды она должна быть равна нулю. Такое распределение не вытекало из динамических соображений, хотя и объясняло вид кривых блеска и лучевых скоростей. Причина самих пульсаций оставалась необъясненной.

Между тем чуть раньше публикации работы Гуревича и Лебединского, в том же Ленинградском университете, где они работали, защищал кандидатскую диссертацию еще никому не известный молодой астрофизик С. А. Жевакин. Тема диссертации была: «Цефеиды как термомеханические автоколебательные системы». В этой диссертации и последовавшей за ней серии работ была разработана совершенно новая теория пульсации цефеид, основанная на клапанном механизме.

В отличие от теорий Эддингтона и Росселанда, теория Жевакина исходила из того, что источник пульсаций звезды находится не в центре звезды, а на периферии (поэтому ее называли периферической теорией). Таким источником является сферический слой двукратной концентрации гелия.

Когда Жевакин только еще знакомился с проблемой, он обратил внимание на работу Эддингтона, в которой указывалось на ионизацию водорода как на возможный пример клапанного механизма. Эта идея ему понравилась. Он попробовал сделать некоторые расчеты. Зона, в которой происходит ионизация водорода, лежит неглубоко от поверхности звезды — на глубине примерно от 300 до 2000 км (зоной ионизации водорода можно условно считать область, где степень ионизации, т. е. доля ионизованных атомов, меняется от 0,02 до 0,98)*). Таким образом, ее толщина ΔR составляет около 2000 км = $2 \cdot 10^8$ см. Радиус звезды δ Цефея равен $R = 3,36 \cdot 10^{12}$ см, значит, объем зоны ионизации водорода $4\pi R^2 \cdot \Delta R = 2,8 \cdot 10^{34}$ см³. Средняя плотность в этой зоне 10^{-10} г/см³, значит, масса заключенного в ней газа около $3 \cdot 10^{24}$ г. Считая, что звезда на 60% состоит из водорода (по массе), находим массу водорода в зоне. Затем делим эту массу на массу одного атома ($1,65 \cdot 10^{-24}$ г) и находим, что в зоне содержится примерно 10^{48} атомов водорода. Пусть половина из них ионизована. Энергия ионизации одного атома равна 13,6 эв = $2,2 \cdot 10^{-11}$ эрг. Значит, общая энергия ионизации водорода в зоне составляет около 10^{37} эрг. Около 40% этой энергии должно, по теории, перейти за время $P = 5,37$ суток = $4,64 \cdot 10^5$ секунд (т. е. за период изменения блеска звезды) в энергию пульсаций. Значит, ежесекундный выход энергии был бы 10^{31} эрг/сек. Но из наблюдений следует, что звезда использует ровно в 200 000 раз больше!

Нет, ионизация водорода объяснить колебаний звезды не может, думал Жевакин. Нужен более мощный источник. Да и расположена эта водородная зона слишком близко от поверхности. Но ведь немного глубже начинается ионизация гелия — второго по распространенности в звездах элемента. Энергия ионизации гелия больше, чем у водорода, да и зона пошире. Но и однократная ионизация гелия давала слишком мало энергии. Тогда Жевакин решил рассмотреть двукратную ионизацию. Здесь положение было совсем иное: энергия ионизации составляла уже 54 эв, зона двукратной ионизации гелия, соответствовавшая температурам от 35 000 до 55 000°, имела ширину 880 000 км. Произведя совершенно аналогичные расчеты, Жевакин

*) Эти глубины различны у звезд разных спектральных классов. Данные приведены для класса G. У звезд класса A зона ионизации водорода начинается прямо с поверхности.

получил... $2 \cdot 10^{36}$ эрг/сек, т. е. столько же, сколько давали наблюдения. Расхождение составило около 13%.

Стало ясно, что зона двухкратной ионизации гелия может быть источником энергии для пульсаций звезды. Но это было только начало работы. Нужно было вывести уравнения, описывавшие весь ход явлений, объяснить все необъясненные эффекты. Жевакин не терял времени, он последовательно разрабатывал одну задачу за другой.

А между тем проблемой пульсации цефеид заинтересовался другой советский ученый, доктор физико-математических наук Д. А. Франк-Каменецкий.

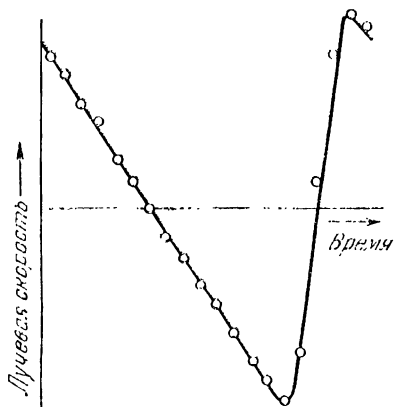


Рис. 23. Кривая лучевых скоростей δ Цфея по Д. А. Франк-Каменецкому (сплошная линия) и данным наблюдений (кружки).

Начиная с 1951 г. он стал развивать теорию, прямо противоположную теории Жевакина, — теорию центральных пульсаций. Как мы уже объясняли, в этой теории предполагается, что источник пульсаций находится близ центра звезды. Поэтому амплитуда колебаний должна убывать от центра к периферии. Основным предположением в теории Франк-Каменецкого было то, что колебания интенсивности ядерных реакций (вызванные сжа-

тием и повышением температуры в центральных частях звезды) вызывают не только механические волны сжатия и расширения, но и тепловые волны. Тем самым Франк-Каменецкий устранял возражение Каулинга против дизель-механизма. Эти-то тепловые волны передают энергию наружу и заставляют пульсировать наружные слои звезды.

Но всякая теория требует проверки наблюдениями. Франк-Каменецкий рассчитал, исходя из своей теории, кривую лучевых скоростей δ Цфея и сравнил с наблюдаемой. Согласие было поразительным (рис. 23).

В конце октября 1954 г. в Москве состоялось Четвертое совещание по вопросам космогонии, специально посвященное проблеме нестационарных звезд. И здесь все авторы

конкурирующих теорий встретились в захватывающе интересной дискуссии.

Первый доклад сделал Д. А. Франк-Каменецкий, изложивший свою теорию тепловых волн и показавший график с сопоставлением вычисленных и наблюдаемых лучевых скоростей δ Цефея. В своем докладе он попытался критиковать теорию Жевакина, считая, что она не может объяснить радиальные, сферически-симметричные пульсации, а также асимметрию кривых блеска цефеид.

С. А. Жевакин немедленно ответил. Сначала он указал на ошибки, допущенные Франк-Каменецким при решении системы уравнений собственных колебаний звезды. Ошибок было несколько, но основная состояла в том, что система была составлена для плоскопараллельных слоев, а не для сферической звезды и условия в центре звезды не были заданы. Из-за увеличения плотности звезды к центру любое колебание, зародившееся близ поверхности, должно убывать с глубиной. Но из-за уменьшения температуры к поверхности уменьшается и скорость звуковых колебаний — от центра к периферии почти в 30 раз. Поэтому и волна, возникающая в центре, донесет до поверхности лишь ничтожную долю своей энергии.

После этого С. А. Жевакин изложил свою собственную теорию периферических колебаний. Он привел свой расчет энергии колебаний δ Цефея, основанный на гипотезе о роли зоны двукратной ионизации гелия как клапанного механизма, а затем показал, почему у цефеид получается запаздывание максимума блеска на четверть периода, а у звезд типа Миры Кита — его упреждение. Попутно он объяснил и причину неправильных изменений блеска у целой группы звезд, которые так и называются — неправильными переменными.

Вот как объяснял С. А. Жевакин эти три явления. Представим себе звезду (рис. 24) разделенной на три области: центральную часть a , зону ионизации b и внешний слой c . При сжатии звезды из зоны a в зону b поступает избыточный поток излучения. В зоне ионизации b происходит поглощение, а затем выделение энергии, поэтому колебания температуры, плотности и радиуса этой зоны не будут адiabатическими. Пусть отношение изменения температуры в зоне $\Delta T/T$ к соответствующему адиабатическому изменению $(\Delta T/T)_{ад}$ равно y . Назовем эту величину y параметром неадiabатности. Оказывается, этот параметр и является

решающим в определении типа и характера звездной переменности.

Действительно, если у некоторого слоя звезды $y > 2$, то такой слой неспособен заметно поглощать поток излучения. Ведь если бы было иначе, то наш слой так сильно нагрелся бы (более чем вдвое сильнее, чем «нормальный», адиабатический слой), что оказался бы прозрачным для излучения и сразу выпустил бы поглощенное тепло. Такой слой подобен ящику с нижней крышкой, прижатой очень слабой пружиной: стоит насыпать туда даже немного песка («излучения»), как крышка откроется и песок высыпется вниз.

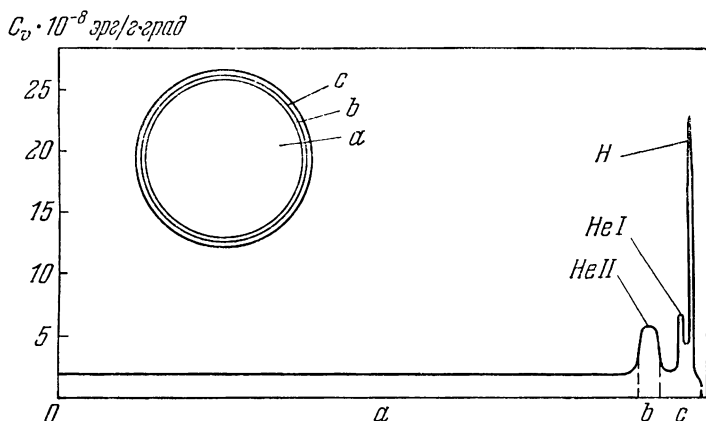


Рис. 24. Схема строения цефеиды по С. А. Жевакину.

Уменьшение параметра y соответствует увеличению силы пружины: чем сильнее пружина, тем больше песка надо насыпать в ящик, чтобы он открылся, тем с большим запаздыванием будет открываться крышка. Это запаздывание и соответствует фазовому запаздыванию максимума блеска цефеид. По мере уменьшения параметра y угол запаздывания (по фазе) растет, и, если y заключен в пределах $1,0 \div 0,7$, этот угол близок к 90° . Область c — более разреженная, находится в состоянии, сильно отличающемся от адиабатического (лучистое равновесие!), и свободно пропустит излучение с той же амплитудой и фазой, какие сформировались в области b .

Так обстоит дело у цефеид — горячих звезд, белых и желтых гигантов, с довольно большим ускорением силы

тяжести у поверхности (определяющим ход давления, что тоже имеет значение).

Звезды типа Миры Кита — почти все красные гиганты с низкой температурой и большими радиусами, а значит, с малым ускорением силы тяжести. Малые значения T и g приводят к низким значениям y : от 0,45 до 0,60. У таких звезд зона ионизации лежит глубже, и внешняя зона c , более широкая, способна «переформировать» колебания потока излучения, образовавшиеся в ионизованной зоне. При сжатии такой звезды зона b перехватит поток излучения, идущий из зоны a , не пропуская его в зону c . Поэтому зона c будет т е р я т ь, а не поглощать тепло. Колебания блеска звезды определятся теперь изменениями температуры зоны c , а не b , а они, как мы только что видели, п р я м о п р о т и в о п о л о ж н ы п о ф а з е колебаниям температуры зоны b . Но в зоне b происходит фазовое запаздывание примерно на 90° , значит, у зоны c общее запаздывание будет $90 + 180 = 270^\circ$, или, если хотите, опережение максимума блеска против стадии наибольшего сжатия на 90° . Именно это и наблюдается у звезд типа Миры Кита.

Но должен существовать какой-то переход от одного типа переменных звезд к другому. Да, такой переход существует и соответствует значениям y от 0,6 до 0,7. На таком узком интервале происходит как бы «заглубление» зоны b на такую величину, которая резко изменяет толщину и свойства зоны c (дело не только в изменении ее геометрической толщины, но и в том, что к ней «подключаются» снизу более плотные и горячие слои). Из совершенно прозрачной для излучения, идущего из зоны b , она становится своеобразным переизлучателем, создающим дополнительное запаздывание по фазе на 180° (когда зона b охлаждается, отдавая тепло зоне c , последняя разогревается, и наоборот).

Этому интервалу и соответствует область неправильных переменных звезд. Здесь случайные изменения потока излучения на 10—20% вызовут изменение y на такую же величину, а этого будет достаточно для изменения амплитуды колебаний потока излучения в 4—5 раз и изменения фазы колебаний в пределах от $+90^\circ$ до -90° .

Ну, а если $y < 0,45$, что будет тогда? Тогда зона b окажется столь глубоко и будет поглощать так мало тепла (в два с лишним раза меньше, чем в адиабатическом случае), что не сможет поддерживать колебания. В нашем примере с ящиком и пружиной это соответствует очень сильной пружине, которая под грузом насыпаемого сверху песка

приоткрое крышку ровно настолько, чтобы песок непрерывно сыпался вниз в том же количестве, в каком его насыпают сверху.

Такова была теория Жевакина, изложенная им в его докладе. В заключение он показал Г—Р-диаграмму с нанесенными на нее переменными звездами всех трех типов (цефеиды, неправильные и звезды типа Миры Кита) и проиллюстрировал, что она полностью соответствует его теории.

После этого выступили А. И. Лебединский и Л. Э. Гуревич. Они изложили свою теорию цефенд, которая нам уже известна, и со своей стороны подвергли критике теорию Жевакина. Ответил ему, хотя и очень кратко, и Д. А. Франк-Каменецкий.

Пolemика продолжалась в научной печати. На следующий год в сборнике «Вопросы космогонии» (т. IV) появилась большая статья Д. А. Франк-Каменецкого «Центральная и периферическая теория пульсаций цефенд». Рассматривая в ней обе конкурирующие теории, Франк-Каменецкий писал:

«Наличие в четко сформулированном виде двух альтернативных теорий должно стимулировать дальнейшее развитие теории переменных звезд. Каждая из теорий должна быть разработана так, чтобы быть доведенной до выводов, доступных сопоставлению с наблюдаемыми фактами. Только такое сопоставление позволит в конце концов сделать выбор между этими конкурирующими теориями. До этого вполне закономерно и целесообразно параллельное развитие той и другой теории».

Это была совершенно правильная постановка вопроса. И вообще вся полемика между Д. А. Франк-Каменецким и С. А. Жевакиным напоминала шахматный матч между двумя гроссмейстерами. Она проходила в исключительно корректной, спокойной форме. Правда, один из противников был доктор наук, а второй только кандидат, и к тому же кандидату приходилось вести, хотя и не столь напряженную, борьбу с двумя другими докторами наук: Л. Э. Гуревичем и А. И. Лебединским. Один против трех! Борьба была на первый взгляд неравной. В такой ситуации не все могут выдержать: нередко авторитет научных противников настолько подавляет, что молодой исследователь сам начинает видеть у себя несуществующие ошибки.

С. А. Жевакин выдержал испытание. В следующем томе «Вопросов космогонии», вышедшем в 1957 г., он ответил своим оппонентам. Подробно, пункт за пунктом, он разоб-

рал все возражения против периферической теории пульсации цефеид и показал их несостоятельность, а затем столь же методично указал на основные ошибки конкурирующих теорий.

Д. А. Франк-Каменецкий выступил в том же томе «Вопросов космогонии». Как истинный гроссмейстер, он протянул своему сопернику руку, признавая свое поражение. Впрочем, признав ряд конкретных ошибок (в частности, невозможность роста амплитуды колебаний от поверхности к центру), Д. А. Франк-Каменецкий не считал возможным ставить крест на центральной теории пульсаций, собираясь провести дальнейшие исследования в этом направлении. Но это ему сделать не удалось: его внимание привлекли другие задачи астрофизики. Не возвращались больше к теории цефеид и Л. Э. Гуревич с А. И. Лебединским.

А Жевакина, успешно защитив в 1956 г. докторскую диссертацию «Теория пульсационной звездной переменности», публиковал одну работу за другой. Он объяснил зависимость «период — светимость» у цефеид, в том числе и разброс светимостей для данного значения периода. Затем развил дальше вопрос о зависимости типа переменности звезды от параметра неаднабитности, «рассортировав» различные типы пульсирующих переменных по значениям этого параметра. После уточнения теории начались машинные расчеты моделей пульсирующих звезд. Теория С. А. Жевакина была признана и за рубежом. Американский астроном Р. Кристи еще больше усовершенствовал ее и провел большую серию расчетов с помощью электронно-вычислительных машин. Оболочку звезды он разделял на 40 слоев и мог проследить, таким образом, изменения температуры, плотности и радиуса в каждом слое отдельно. Пример такого расчета показан на рис. 25. Другую большую серию расчетов провел ученик С. А. Жевакина, сотрудник Горьковского радиофизического института В. И. Алешин.

И наконец пришло официальное признание ценности многолетнего труда. В начале 1966 г. Президиум Академии наук СССР присудил доктору физико-математических наук С. А. Жевакину за цикл работ по теории звездной переменности премию имени Ф. А. Бредихина за 1965 год.

Как мы писали в главе I, цефеиды занимают особую область на Γ — P -диаграмме — пробел Герцшпрунга. Исследование эволюционных треков звезд с разной массой и химическим составом показало, сколько времени тратит звезда на пересечение «области неустойчивости» и каково ее

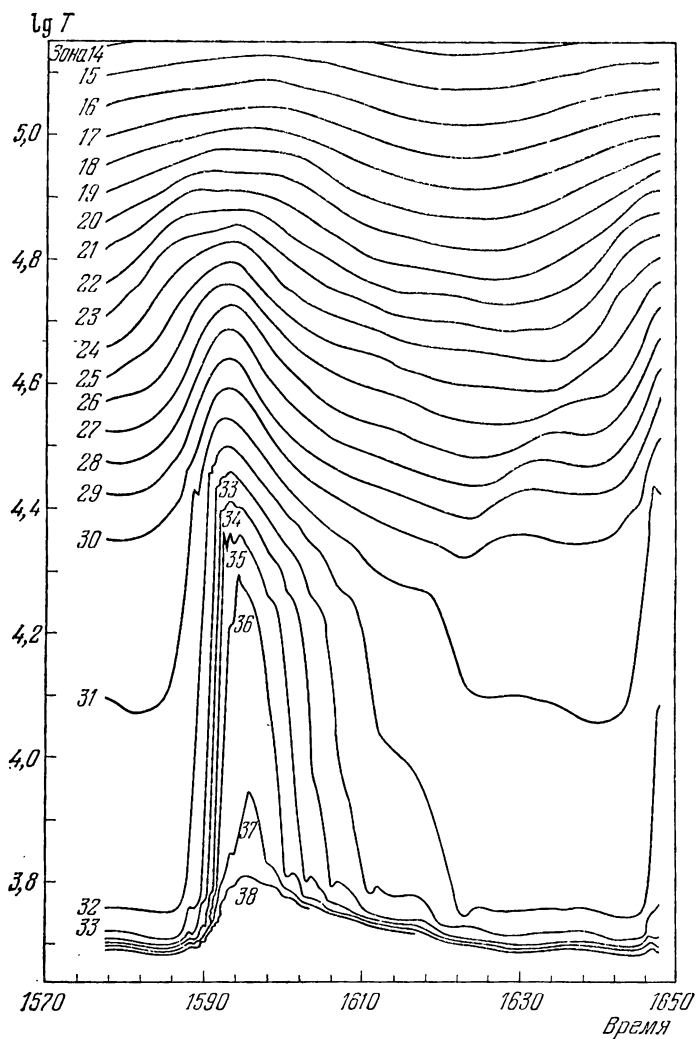


Рис. 25. Изменения температуры в разных слоях цефеиды (по Кристи).

строение в этот момент (стр. 83). Советские астрономы Ю. Н. Ефремов и И. М. Копылов путем статистического изучения 11 звездных скоплений показали, что процент звезд класса В, находящихся в стадии цефеиды, согласуется с этими выводами теории. Таким образом, теория звездной эволюции и теория пульсации цефеид не только взаимно подтверждали друг друга, но и обе подтвердились наблюдениями.

Так завершилась 90-летняя история объяснения переменности цефеид.

Рождение или смерть?

Еще древние астрономы замечали, что иногда на небе вспыхивает новая звезда. Удивив всех своей внезапной вспышкой, звезда-гостья медленно слабеет и исчезает с небосвода. Появление новых звезд отмечено в китайских летописях: одна из них появилась, например, в июле 134 г. до н. э. в созвездии Скорпиона, другая — в 173 г. н. э., причем была видна 8 месяцев.

Яркую новую звезду наблюдал 11 ноября 1572 г. Тихо Браге. Ее так и называли «звезда Тихо». Спустя 32 года, 1604 г., вспыхнула еще одна яркая новая звезда, которую описал Кеплер. Она получила название «звезды Кеплера». Об этих двух новых звездах мы расскажем подробнее дальше.

После появления, а затем угасания звезды Кеплера прошло два с половиной столетия, но больше новых звезд не появлялось. Астрономы знали из старых книг и летописей только факты и даты их появления и исчезновения, примерную яркость и продолжительность их свечения. Было ясно, что это — не рождение новой (в буквальном смысле) звезды, а что-то другое. Но что? Для суждения об этом у астрономов было мало данных.

И вот в ночь с 12 на 13 мая 1866 г. в созвездии Северной Короны вспыхнула новая звезда. Она разгорелась за несколько часов и достигла второй величины. На этот раз в распоряжении астрономов уже был спектральный анализ. Правда, был спектроскоп, но еще не было спектрографа: спектры можно было изучать визуально, но еще нельзя было фотографировать. 16 мая известный английский спектроскопист Уильям Хэггинс изучил спектр новой, которая получила обозначение Т Северной Короны. Астроном был очень удивлен: спектр как бы принадлежал двум разным звездам. С одной стороны, в нем были темные линии и

полосы поглощения, как у красных звезд класса М (по современной классификации), но, с другой стороны, в спектре выделялись яркие линии, в основном принадлежавшие водороду.

24 ноября 1876 г. появилась новая звезда в созвездии Лебедя. Она достигла третьей величины. Спустя 9 лет Э. Гартвиг, эстонский астроном, работавший на обсерватории в Дерпте (ныне Тарту), обнаружил новую звезду в другой галактике — в туманности Андромеды. В ее спектре тоже наблюдались яркие линии.

Девяностые годы, когда впервые удалось сфотографировать спектр новой, сильно продвинули вперед наши знания о природе новых звезд. Первой звездой, для которой удалось получить фотографию спектра (спектрограмму), была Новая Возничего, вспыхнувшая 10 декабря 1891 г. Однако об этом узнали много позже, при просмотре фотографий, а фактически вспышка была обнаружена 1 февраля 1892 г. Через год сотрудница Гарвардской обсерватории миссис Флеминг, просматривая фотографии звездных спектров, полученные на южной базе в Арекипе (Перу), по характерному виду спектра с яркими линиями обнаружила Новую Наугольника. Затем последовали одна за другой еще несколько новых, открытых по спектрам, полученным с объективной призмой. Десятилетие закончилось вспышкой яркой Новой Персея 21 февраля 1901 года, которую первым заметил киевский гимназист Андрей Борисяк. Спектр ее ясно показывал изменения, которые наблюдались и у других новых.

Вот как выглядят весьма сложные превращения спектра новой. В первые часы или дни, до достижения максимума блеска, спектр звезды напоминает спектр горячего сверхгиганта класса В или А с линиями поглощения, сильно смещенными к фиолетовому концу, — это смещение соответствует скорости приближения около 1000 км/сек . Затем спектр становится больше похож на спектр класса А или F с очень тонкими, резкими линиями поглощения. После максимума этот предмаксимальный спектр сменяется главным спектром новой, характерным появлением ярких линий, очень широких и окаймленных с фиолетовой стороны линиями поглощения, смещенными еще сильнее, чем прежде. Среди них — линии водорода, гелия, натрия, углерода, кислорода, ионов кальция, железа, титана. Впрочем, появляются и яркие «запрещенные» линии, характерные для спектра полярных сияний, солнечной ко-

роны и других объектов, где происходит высвечивание разреженных газов *). Скорость движения светящихся газов к наблюдателю достигает 1500 км/сек, затем становится еще больше, появляются новые линии поглощения.

Когда блеск новой идет на убыль и она ослабевает на 1—2 звездные величины, главный спектр слабеет и появляется д и ф ф у з н о - и с к р о в о й спектр, содержащий линии поглощения водорода, ионов, кальция, железа и других металлов, очень размытые и смещенные в сторону коротких волн в полтора-два раза сильнее, чем в главном спектре, причем это смещение колеблется! Одновременно возникает новая система широких ярких линий.

Когда блеск звезды после максимума падает на 3—4 звездные величины, появляется так называемый о р и о н о в спектр поглощения, напоминающий спектр звезд класса В, которых много в созвездии Ориона. Линии этого спектра соответствуют более высоким степеням возбуждения, чем у диффузно-искрового спектра, и смещены к фиолетовому концу еще сильнее. Орионов спектр тоже сопровождается системой ярких линий излучения.

Между тем изменение блеска новой достигает переходной стадии: блеск (а вместе с ним интенсивность и величина смещения линий спектра) испытывает колебания, а иногда резко падает, но потом вновь возрастает, хотя и не до прежнего значения. Один за другим исчезают спектры поглощения, сперва диффузно-искровой, за ним орионов и последним — главный спектр. Остаются яркие линии, причем появляются новые запрещенные линии, принадлежащие многократно ионизованным атомам кислорода, азота, неона, железа и других элементов. Спектр звезды становится похож на спектр круглых или кольцеобразных планетарных туманностей. Эта последняя стадия развития новой звезды — н е б у л я р н а я — может продолжаться очень долго, до десятков лет. Яркие линии постепенно слабеют. Вокруг звезды и вправду образуется туманная кольцеобразная оболочка.

Как удалось установить при помощи фотографии, при вспышке новые звезды увеличивают свой блеск на 10—12 звездных величин, т. е. в 10—60 тысяч раз.

*) В плотных газах «запрещенные» линии не наблюдаются, так как состояние возбуждения, с которого должен излучить такую линию атом, быстро разрушается ударами других атомов и свободных электронов.

Что же происходит при вспышке новой звезды? Та сложная картина изменений в ее спектре, которую мы только что описали, стала известной астрономам не сразу, а лишь после тщательного изучения спектров примерно десяти ярких новых, вспыхнувших уже в XX в. Как же объясняли или, вернее, пытались объяснить это явление ученые XIX в.?

Вряд ли какое-либо явление настолько поставило ученых в тупик и внесло полную растерянность в их мысли, как вспышки новых. Как заметил известный советский исследователь новых звезд профессор Б. А. Воронцов-Вельяминов, число гипотез о происхождении новых превышало количество самих новых, наблюдавшихся за всю историю астрономии. Каких только гипотез не предлагали астрономы столет назад! Вот, посмотрите.

Гуго Зеелигер, немецкий астроном, директор Мюнхенской обсерватории: звезда на своем пути встретила туманную газообразную массу и пронизала ее, возбуждив ее свечение, а заодно и разогрелась сама; возможно, что звезда при этом теряет устойчивое состояние и взрывается.

Норман Локиер, английский астроном, автор первой гипотезы об эволюции звезд: встретились два метеорных потока, из которых один приближался к нам, а другой удалялся (бедный Локиер, видимо, и представления не имел, что даже в самых плотных метеорных роях одна частица отстоит от другой на десятки километров, так что столкновения между ними совершенно невероятны, а тем более в нужном количестве).

Сванте Аррениус, шведский астроном и космогонист: новые звезды вспыхивают в результате столкновения двух слабых и погасших небесных тел (этот взгляд Аррениус защищал даже в 1918 г.).

Вильгельм Клинкерфус, немецкий астроном, работавший в Геттингене: новые звезды — двойные системы (тут шутки в сторону: Клинкерфус не ошибся); спутник движется по очень вытянутой орбите, и когда он приближается к главной звезде, то своим притяжением вызывает сильный прилив на ее поверхности, а возможно, — ряд вспышек и извержений, которые и являются причиной резкого нарастания блеска, его последующих колебаний, а затем угасания звезды.

А. А. Белопольский, русский астрофизик, систематически наблюдавший спектры новых с 1892 по 1920 г.: в явлении новой мы имеем дело, вероятно, с двумя или несколькими телами; одно из них, холодная звезда с плотной водо-

родной атмосферой, движется к нам, а другое, звезда меньшей массы, но горячая, с яркими водородными линиями, — сперва тоже к нам, а потом от нас; огибая главную звезду по гиперболе, эта звезда проходит сквозь атмосферу главной звезды, где вызывает возбуждение свечения, а когда выходит из нее, блеск системы начинает падать.

У. Хёггинс, английский астрофизик-спектроскопист: происходит встреча на близком расстоянии двух звезд; дальше события разворачиваются в соответствии с гипотезой Клинкерфуса.

И. Вильзинг, немецкий астрофизик-спектроскопист, работавший на Потсдамской обсерватории: смещение линий в спектрах новой не связано с принципом Доплера — Физо; оно объясняется явлением флуоресценции; вытеснение одного спектра другим связано с протеканием на поверхности звезды электрических процессов, но каких именно, Вильзинг не уточняет.

Все эти гипотезы, высказанные в 90-е годы XIX в., не имели серьезного теоретического и наблюдательного обоснования и вскоре рассыпались, как карточные домики.

Первая четверть XX в. принесла астрономам вспышки многих ярких новых, среди них, кроме уже упомянутой Новой Персея, следует упомянуть вспышки Новой Орла 1918 г., Новой Лебеда 1920 г., Новой Живописца 1925 г. В туманности Андромеды до 1929 г. на Гарвардской обсерватории было зарегистрировано свыше 80 новых. Подсчеты показывали, что ежегодно в этой звездной системе должно вспыхивать около 30 новых. В нашей Галактике каждый год стали наблюдать одну-две вспышки новых. С учетом межзвездного поглощения и других факторов это показывало, что частота вспышек новых в нашей Галактике не меньше, чем в галактике Андромеды.

Но этот вывод ставил крест на всех гипотезах происхождения новых звезд в результате случайных встреч и катастроф. Ведь вероятность таких встреч даже в 150-миллиардном населении нашей Галактики ничтожна.

Первоначально (примерно до 1950 г.) считалось, что в галактике Андромеды около трех миллиардов звезд. Если ежегодно там вспыхивает 30 новых, то, значит, каждая из звезд этой галактики один раз в 100 миллионов лет должна вспыхнуть как новая. Такое предположение высказал в 1923 г. шведский астроном К. Лундмарк, собравший и систематизировавший все накопленные к тому времени наблюдения новых.

Но Лундмарк допустил ошибку. Расстояние до галактики в Андромеде он определил в 650 000 световых лет по кривой «период — светимость» для цефеид. Лишь через 30 лет В. Бааде доказал, что нуль-пункт этой зависимости требует исправления, так что все расстояния до других галактик (а значит, и их размеры) должны быть увеличены в 2—3 раза. Поэтому число звезд в галактике Андромеды оказывалось в 5—10 раз большим, чем предполагалось, и измерялось многими десятками миллиардов. Выходило, что либо за свою жизнь каждая звезда должна вспыхнуть 1—2 раза, либо вспыхивала только часть звезд, но по многу раз.

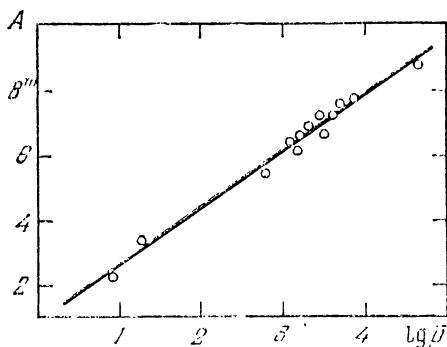


Рис. 26. Зависимость «период — амплитуда» у звезд типа U Близнецов (по П. П. Паренаго и Б. В. Кукаркину).

Еще задолго до работы Бааде, в 1934 г., молодые советские астрономы П. П. Паренаго и Б. В. Кукаркин нашли зависимость между периодом и амплитудой увеличения блеска полуправильных переменных звезд типа U Близнецов, которые раз в несколько недель или месяцев вдруг внезапно (почти как новые) вспыхивали, увеличивая блеск на две — пять звездных величин (рис. 26). Паренаго и Кукаркин установили, что у таких звезд амплитуда прямо пропорциональна периоду между «вспышками». К тому времени уже были известны две звезды, которые называли повторными новыми; они вспыхивали по два-три раза. Это были Т Компаса, вспыхивавшая в 1890, 1902 и 1920 гг. с амплитудой 6,5 звездной величины, и RS Змееносца, вспышки которой (с почти такой же амплитудой) наблюдались в 1898 и 1933 гг. Обе звезды удовлетворяли найденной зависимости. Паренаго и Кукаркин высказали предполо-

женне, что такая зависимость «период — амплитуда» — общий закон для всех вспыхивающих звезд. Чтобы проверить это, они выбрали «настоящую» новую звезду Т Северной Короны 1866 г. со сравнительно небольшой амплитудой возрастания блеска (9 звездных величин) и предсказали, что она должна вновь вспыхнуть через 80—100 лет.

Прошло 12 лет, и вот 8 апреля 1946 г. любитель астрономии, путевой обходчик А. С. Каменчук первым (на сутки раньше других наблюдателей) заметил вторичную вспышку Т Северной Короны. Прогноз Паренга и Кукаркина блестяще оправдался. К этому времени Т Компаса вспыхнула еще раз (в 1944 г.) и обнаружилось еще три повторных новых: U Скорпиона, WZ Стрелы и V 1017 Стрельца. По шести повторным новым зависимость «период — амплитуда» была уточнена. Из нее следовало, что вспышки новых с большой амплитудой (12—14 звездных величин) должны повторяться через тысячи и десятки тысяч лет — время, большое для нас с вами, но ничтожно малое в сравнении со сроком жизни звезды.

Основываясь на этом, Б. А. Воронцов-Вельяминов в 1947 г. сделал вывод, что вспыхивать может лишь определенная, не слишком многочисленная группа звезд и можно не опасаться, что в один далеко не прекрасный день вспыхнет подобно новой звезде и наше Солнце, испепелив все живое на Земле. А ведь такие идеи всерьез обсуждали некоторые ученые за рубежом, их подхватывали и распространяли, сопровождая красочными описаниями всяких ужасов, падкие до сенсаций популяризаторы.

Но отчего же все-таки вспыхивают новые звезды? В самом начале 30-х годов гипотезу, объясняющую вспышки новых глубокими внутренними изменениями, разработал английский астроном Э. А. Милн. Рассматривая ход звездной эволюции, он полагал, что вспышка новой — закономерный этап в жизни почти каждой звезды. Спектральные наблюдения указывали на движения газовых масс в сторону наблюдателя с колоссальными скоростями — до 1500 км/сек и более. Значит, происходит взрыв и сбрасывание газовых оболочек — не одной, а нескольких, соответствующих каждой «своему» виду спектра. Но после вспышки звезда, хотя и возвращается к первоначальному блеску, имеет гораздо более высокую температуру. А отсюда может быть лишь один вывод: звезда становится меньше, чем до вспышки, она «спадается». Так, Новая Персея имела до вспышки температуру 10 000°, а после вспышки 50 000°.

хотя блеск ее стал прежним. Но если температура повысилась в 5 раз, то интенсивность излучения увеличилась в $5^4 = 625$ раз и, очевидно, во столько же раз уменьшилась поверхность звезды. Это соответствует уменьшению радиуса в 25 раз, т. е. превращению звезды в белый карлик.

Белые карлики! Они и тогда, в 1930—1931 г., считались конечной стадией жизни звезд. Так вот как умирают звезды! Они вспыхивают, как новые, и затем быстро сжимаются, превращаясь в белый карлик. Но почему? (Тогда ведь еще не знали, как и какие протекают в звездах термоядерные реакции.) По-видимому, звезда достигает какого-то неустойчивого состояния, и вот — взрыв. Оболочки сбрасываются, звезда спадается, вещество ее недр переходит в вырожденное состояние. А если звезда быстро вращалась, то она может разорваться на части. У Новой Живописца 1925 г. наблюдалось что-то вроде разделения на две части. Выходит, гипотеза подтверждается.

Гипотеза Милна сразу же встретила ряд возражений. Главным из них было то, что с позиций этой гипотезы было трудно или даже невозможно объяснить явление повторных новых звезд. Нельзя же было допустить, что звезда, превратившись в белый карлик, потом вновь вернется к прежнему состоянию, затем опять испытает взрыв и спадание (коллапс) и т. д. Все же идеи Милна пытались разрабатывать немецкий астроном В. Гротриан и уже известный нам Г. А. Гамов, который пытался связать взрывы новых с термоядерными процессами.

В 1946 г. к этой проблеме обратились А. И. Лебединский и Л. Э. Гуревич. Они тоже сперва исходили из концепции центрального термоядерного взрыва, считая, что причиной его может быть «перепроизводство» энергии. При быстром, почти мгновенном выделении большого количества энергии в недрах звезды (а энергия, выделяемая обычной новой во время вспышки, составляет примерно 10^{46} эрг — такое количество энергии наше Солнце вырабатывает за 80 000 лет) от центра к поверхности звезды пойдет сильная ударная волна, которая и обеспечит срыв оболочки. Л. Э. Гуревич и А. И. Лебединский проделали большую работу по построению теории теплового взрыва и распространения ударных волн в звездах. Они пришли к выводу, что с переходом в более разреженные слои звезды ударная волна у с к о р я е т с я, и неудивительно, что на поверхность она выходит с такой огромной скоростью.

Теория сильного точечного взрыва, когда в весьма ограниченной области пространства (в «точке») мгновенно выделяется большая энергия, была тогда же (в 1946 г.) развита членом-корреспондентом АН СССР (ныне академиком) Л. И. Седовым, крупным специалистом в области гидродинамики и газовой динамики. Независимо от него и почти одновременно решение подобной задачи получил молодой доктор технических наук К. П. Станюкович. Теория Л. И. Седова давала возможность найти закон распространения ударной волны, возникающей при взрыве, и рассчитать свойства газа в любой точке за волной.

Л. И. Седов ясно понимал, что созданная им теория может и должна иметь применение в ряде задач астрофизики. Понимали это и другие ученые-газодинамики. В 1949 г. в Париже было созвано международное совещание по проблемам космической аэродинамики, где впервые встретились астрофизики и специалисты в области газовой динамики. Произошел полезный обмен мнениями. Впоследствии такие совещания созывались неоднократно.

В 1953 г. Л. И. Седов применил свое решение задачи о сильном взрыве к случаю, когда плотность газа, по которому распространяется волна, убывает от точки взрыва. Этот случай лучше соответствовал условиям в звезде. В 1954 г. Л. И. Седов сделал следующий шаг: он учел силы тяготения, которые в звезде играют большую роль, в отличие от сгустка газа малой массы и плотности. Однако лучистым давлением он пренебрег.

В отличие от Л. И. Седова, Л. Э. Гуревич и А. И. Лебединский не стремились к математической строгости решения задачи, зато уделяли больше внимания физической стороне явления. Впрочем, они исходили из тех же уравнений, что и Седов, да иначе и быть не могло.

Но скоро Лебединский и Гуревич поняли, что гипотеза центрального взрыва наталкивается на непреодолимые трудности. На эти трудности еще в 1939 г. указал молодой профессор Ленинградского университета В. А. Амбарцумян.

Начиная в 1931 г. чтение курса теоретической астрофизики в Ленинградском университете, 23-летний доцент встретился с фактом отсутствия на русском языке курса или учебника по этому предмету. Курс пришлось создавать самому, но не копируя зарубежные образцы, а творчески. В главе о новых звездах Амбарцумян сразу обращает внимание на то, что энергия центрального взрыва не может

быть быстро вынесена на поверхность за счет передачи ее излучением. Кроме того, как подсчитали В. А. Амбарцумян и Н. А. Козырев в 1933 г., масса выброшенной оболочки не превосходит ($10^{-4} \div 10^{-3}$) M_{\odot} , что тоже не вяжется с гипотезой центрального взрыва, потрясающего всю звезду. Поэтому, по мысли Амбарцумяна, взрыв должен быть периферическим, а не центральным.

Эту идею периферического взрыва Лебединский и Гуревич разработали в 1947 г., предложив следующий механизм. Если звезда эволюционирует так, что температура ее периферических частей повышается хотя бы вдвое за 10^7 лет (а мы знаем, что так оно и будет по мере выгорания водорода; см. стр. 81), то с ростом температуры будет интенсивно расти и выделение тепла за счет ядерных реакций, особенно от углеродно-азотного цикла. Этот рост тепла не компенсируется его потерей за счет излучения в пространстве. Начинается еще более быстрый разогрев внешних слоев, граница ядерных реакций продвигается наружу, и дело заканчивается взрывом, но не центральным, а периферическим. Ударная волна выносит энергию наружу.

Л. Э. Гуревич и А. И. Лебединский продолжали разрабатывать эту гипотезу, а в октябре 1954 г. изложили результаты своей работы на Четвертом совещании по вопросам космогонии (том самом, где проходила дискуссия о природе пульсаций цефеид). Кроме них, некоторые идеи о физических причинах вспышек новых звезд высказали А. Г. Масевич и С. А. Каплан. В основе этих идей лежало предположение, что ударная волна возникает при внутренней перестройке звезды, связанной с выгоранием водорода в ядре и с последующим быстрым сжатием звезды. Но количественной разработкой эти идеи не получили.

На том же совещании выступил и академик Л. И. Седов, изложивший теоретические результаты, полученные им и его учениками при разработке теории сильного центрального взрыва. Увы, отсутствие должных контактов между газодинамиками и астрофизиками привело к тому, что, с одной стороны, Л. И. Седов продолжал говорить о центральном взрыве, когда уже было ясно, что в случае новых такой взрыв не имеет места, а с другой стороны, астрофизики не заметили, что решение Л. И. Седова дает правильные результаты для условий выхода ударной волны на поверхность звезды при любой «взрывной» гипотезе. На это обстоятельство обратил их внимание профессор К. П. Станюкович, также крупный специалист в области газовой

динамики, но с юных лет интересовавшийся астрономией и внесший немалый вклад в решение ее отдельных проблем. Он тоже заметил, что рассмотрение точечного взрыва представляет скорее академический интерес: для этого нужно такое большое выделение энергии, которое вряд ли может быть при вспышках новых и даже сверхновых, о которых речь будет впереди. Поэтому областью выделения энергии может быть не обязательно центр звезды, а некоторый слой на периферии. Но тогда ударная волна пойдет не только наружу, но и внутрь, к центру звезды, — это будет так называемая сходящаяся ударная волна. Теория распространения таких волн была разработана Л. Д. Ландау и К. П. Станюковичем еще в 1945 г. Сходящаяся ударная волна может вызвать разогрев центральных областей звезды и усиление ядерных процессов. Сойдясь к центру, она затем как бы отразится от самой себя и снова начнет расходиться, усиливая действие первой (расходящейся) волны и, возможно, приведя к отрыву второй оболочки у новой.

Пока А. И. Лебединский и Л. Э. Гуревич разрабатывали свою теорию вспышек новых звезд (а ее можно было назвать теорией, поскольку она получила количественное физико-математическое обоснование), другой ученый, доктор физико-математических наук Э. Р. Мустель (теперь член-корреспондент АН СССР) взялся за теоретическое истолкование тех сложных изменений спектра, которые наблюдаются у новых звезд. В 1949 г. он опубликовал на эту тему две большие работы. В первой Э. Р. Мустель поставил задачу объяснить, в силу каких процессов происходит замена предмаксимального спектра главным. Этот эпизод в сложной картине вспышки новой, близкой по времени к максимуму ее блеска, но следующей непременно после максимума, объяснить было исключительно трудно. За 15 лет, начиная с 1935 г., для его объяснения пять астрономов предложили восемь разных моделей. Ясно, что предмаксимальный спектр создает какая-то разлетающаяся оболочка. Но почему он потом слабеет и уступает место главному спектру? Рассеивается ли эта оболочка сама по себе или ее что-то уничтожает? Но что именно? Расширяющаяся фотосфера звезды? Другая, сброшенная позже оболочка, обладающая большей скоростью? Поток атомов и газовые конденсации, непрерывно истекающие из звезды? Давление световых лучей? А если оно, то какое именно: общее, в непрерывном спектре, или селективное, в отдельных спектральных линиях? Анализ Мустеля заставил его склониться

к этой последней модели. Но прежде чем сделать такой вывод, ученый подробно рассмотрел все восемь моделей. И против каждой он выдвигал возражения. Чтобы не сбиться, он нумеровал их. Против модели I — возражения Ia, Ib, Iv, ... , Ik. Против модели II — IIa, IIb и т. д. И это несмотря на то, что автором трех из восьми моделей был он сам. Дело ведь не в том, кто автор, а в том, где истина, как удовлетворить всем данным наблюдений.

И хотя в этой работе 1949 г. Мустель «проголосовал» в пользу модели V — селективного давления излучения звезды, спустя 13 лет он вновь пересмотрел этот вопрос и предложил девятую модель: оболочку α , создающую предмаксимальный спектр, догоняют и сжимают высокоэнергичные частицы, в основном протоны, ускоряемые в большом количестве магнитными полями в полости между оболочкой и поверхностью звезды. Плотность и скорость сжатого слоя оболочки (β) больше, чем они были в оболочке α . Оболочка β и создает главный спектр.

Объяснить происхождение диффузно-искрового и орионова спектров было легче: и Э. Р. Мустель, и американский астрофизик Д. Мак-Лафлин, много занимавшийся проблемой новых, объясняли их непрерывными истечениями газов (иногда в виде конденсаций) с фотосферы и из подфотосферного слоя звезды.

Вторая работа Э. Р. Мустеля, опубликованная в 1949 г., рассматривает лишь две модели, объясняющие явление максимума блеска новых. Одна из них (гипотеза А) была предложена еще в 1937—1939 гг. В. А. Амбарцумяном и Ш. Г. Горделадзе. В ней предполагается, что в момент вспышки звезда сбрасывает сферическую оболочку, отделяющуюся от звезды, а затем покидающую ее навсегда. Пока оболочка достаточно плотна, блеск звезды нарастает из-за увеличения размеров оболочки. Но когда оболочка достаточно разрежается, блеск новой начинает убывать.

Другую точку зрения (гипотезу Б) развил сам Э. Р. Мустель. Согласно гипотезе Б, не только оболочка, но и сама звезда перед максимумом расширяется, а потом фотосфера звезды начинает постепенно сжиматься. Максимум наступает в момент наибольшего расширения фотосферы. Общая картина расширения и сжатия звезды в этой гипотезе показана на рис. 27.

Но гипотеза Б требовала объяснить причину сжатия звезды. Э. Р. Мустель допустил сперва, что это — гравитационное сжатие, вызванное колоссальной массой новых

звезд. Он вынужден был приписать им массы в одну-две тысячи солнечных масс!

До этого астрономам не были известны звезды с массами больше $75 M_{\odot}$. Естественно, что гипотеза Э. Р. Мустеля

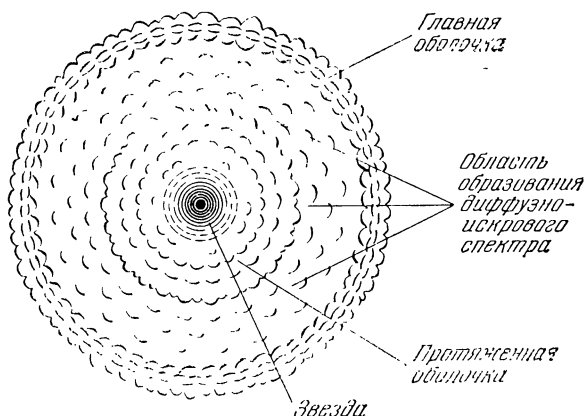


Рис. 27. Расширение новой звезды (по Э. Р. Мустелю).

вызвала сомнения и возражения. На том же Четвертом совещании по вопросам космогонии (октябрь 1954 г.) против нее резко выступили Л. Э. Гуревич и А. И. Лебединский. И тут произошло событие, сразу разрешившее этот спор и одновременно преподнесшее астрономам новую загадку.

Новые звезды преподносят сюрпризы

Летом 1954 г. сотрудник обсерватории Маунт Вилсон Мёрл Уокер проводил на 100-дюймовом рефлекторе фотоэлектрические наблюдения Новой Геркулеса 1934 г. по общей программе наблюдений бывших новых с целью выявления короткопериодических изменений их блеска. Изменения блеска DQ Геркулеса (такое обозначение получила эта новая) напоминали те, что наблюдаются у затменных переменных. В ночь на 31 июля были отмечены два последовательных минимума блеска с интервалом 4 часа 39 минут. Дальнейшие наблюдения подтвердили первоначальный результат: бывшая новая оказалась затменной переменной звездой, да к тому же с самым коротким периодом из всех известных. Следующая за ней — звезда UX Б. Медведицы — имеет период 4 часа 43 минуты. Сходство обеих звезд этим не ограничилось: у обеих обнаружались корот-

копериодические флуктуации блеска и небольшое увеличение блеска перед затмением. Само затмение у DQ Геркулеса продолжалось ровно час и было, по-видимому, частным. Будучи вне затмения 14,2 звездной величины, звезда ослабела в минимуме на 1,3 звездной величины.

Итак, Новая Геркулеса оказалась двойной звездой. Впрочем, сообщения о двойственности этой новой появились и гораздо раньше, вскоре после ее вспышки. Так, 4 июля 1935 г. (через полгода после вспышки) Дж. Койпер наблюдал в 36-дюймовый рефрактор Ликской обсерватории раздвоение новой на две компоненты, находившиеся друг от друга на угловом расстоянии 0,2 секунды дуги. Это наблюдение не замедлили подтвердить астрономы Парижской и Бабельсбергской обсерваторий. Но спектр новой в это время был типично небулярным, т. е. принадлежал туманности, окружавшей звезду. Удалось изучить спектры каждой из компонент в отдельности. Оба они были небулярными. Б. А. Воронцов-Вельяминов тогда же, в 1935 г., изучив спектр новой, указал, что сама звезда излучает непрерывный спектр и имеет блеск 12,5 звездной величины, тогда как обе туманные компоненты были 8-й величины, т. е. в 65 раз ярче. Именно они давали в это время основной вклад в излучение новой. Это были, таким образом, два сгустка выброшенной звездой оболочки. Со временем эти сгустки отдалялись от звезды и друг от друга, и к 1942 г. диаметр туманности увеличился до 4". Скорость расширения туманности в 1935—1942 гг. была около 300 км/сек.

Нечто подобное наблюдалось семью годами раньше у Новой Живописца 1925 г., у которой в марте 1928 г. было тоже замечено «раздвоение».

Но то, что наблюдал Уокер, никаких сомнений не вызвало. Вскоре были получены элементы орбиты. Радиус относительной орбиты оказался равным примерно 350 000 км — почти как у орбиты Луны. Радиусы компонент получились около 100 и 120 тыс. км, т. е. порядка 0,15—0,2 R_{\odot} , массы — порядка 0,1 M_{\odot} , а никак не сотни или тысячи солнечных масс, как полагал для новых звезд Э. Р. Мустель. Так был решен его спор с А. И. Лебединским и Л. Э. Гуревичем, решен не в его пользу. Э. Р. Мустелю пришлось искать другую, негравитационную причину сжатия фотосферы звезды после максимума блеска новой. В 1958 г. он предложил в качестве такой причины действие магнитного поля звезды, но количественно этот механизм остался неразработанным.

Между тем М. Уокер, продолжая тщательные фотоэлектрические наблюдения DQ Геркулеса, обнаружил в 1956 г. (по наблюдениям 1954 г.), что эта звезда в промежутке между затмениями испытывает короткопериодические колебания блеска с периодом в 71 секунду, причем период сохраняется постоянным с точностью до 1 3000 секунды. Наблюдения 1955—1956 гг. подтвердили этот результат. В 1958 г. Уокер объяснил это тем, что главная звезда DQ Геркулеса пульсирует подобно цефеиде. В 1961 г. Уокер обнаружил, что во время затмения 71-секундные колебания блеска прекращаются. Значит, пульсирует действительно затмеваемая звезда.

Французский астрофизик Э. Шацман в том же 1961 г. рассчитал частоту пульсации белых карликов в функции их внутреннего строения. Используя его формулы, американский астроном Р. Крафт нашел массы обеих компонент равными $0,12 M_{\odot}$ и $0,2 M_{\odot}$, радиус белого карлика 17 400 км (1/40 радиуса Солнца). Отсюда его средняя плотность получается равной 10^5 г/см^3 . Другой метод, основанный на соотношении $P \sqrt{\rho} = \text{const}$ для цефеид, дал значение плотности $3,5 \cdot 10^4 \text{ г/см}^3$. Таким образом, было окончательно доказано, что бывшая новая — белый карлик, который является членом затменно-двойной системы и вдобавок пульсирует, как цефеида.

Двойной оказалась не только Новая Геркулеса. Спектр повторной новой Т Северной Короны еще до вспышки 1946 г. был признан составным: кроме нормального спектра гиганта класса M3 в нем присутствовал спектр голубой звезды с эмиссионными линиями. По изменению лучевых скоростей красной звезды удалось определить период обращения: 227,6 суток, а затем массы компонент: $2M_{\odot}$ и $3M_{\odot}$ — и радиус орбиты: 70 миллионов километров.

Спектрально-двойной оказалась и карликовая новая SS Лебедя. Ее период составил 6 часов 38 минут. Одна из звезд — голубая, но с массой всего $0,18 M_{\odot}$, вторая — красный карлик с массой $0,2 M_{\odot}$. Радиус относительной орбиты получился около 500 000 км. Таким образом, эта система очень напоминает систему DQ Геркулеса.

Эври Шацман и Зденек Копал независимо высказали в 1958—1959 гг. гипотезу, что все бывшие и повторные новые — двойные. Но это предположение требовало подтверждения.

Поэтому на обсерватории Маунт Паломар вскоре было предпринято «поголовная» проверка всех бывших и повтор-

ных новых ярче 15,5 звездной величины в минимуме (таких оказалось 22) и звезд типа U Близнецов, удовлетворяющих тому же условию (их известно 25). Из 47 звезд этих типов наблюдениям на Паломарской обсерватории были доступны 37 звезд. Работой руководил Роберт Крафт.

Из 22 звезд типа U Близнецов (карликовых новых) 8 были определено двойными. Сама звезда U Близнецов, по наблюдениям польского астронома В. Кжеминьского на Ликской обсерватории, оказалась затменной переменной, причем одна из звезд — белый карлик с массой, близкой к солнечной, но с радиусом 50 000 км. Можно было полагать, что и остальные 14 звезд двойные.

Из 10 исследованных бывших и повторных новых 6 оказались двойными (Новая Возничего 1891 г., Новая Персея 1901 г., Новая Орла 1918 г., Новая Геркулеса 1934 г., Т Северной Короны 1866—1946 гг., WZ Стрелы 1913—1946 гг.) и одна — кратной звездой (V 1017 Стрельца 1901—1919 гг.). Итого — 70 процентов изученных новых звезд. Для других звезд было недостаточно наблюдений.

Параллельно со сбором наблюдательного материала шло и развитие теории. Прежде всего надо было решить вопрос: была ли каждая новая двойной еще до вспышки или она раздвоилась в процессе вспышки? Различие физических свойств звезд системы решительно говорило против второго варианта. К тому же по старым фотографиям удалось обнаружить затмения DQ Геркулеса за четыре года до вспышки — в 1930 г. Значит, новые с самого начала представляли собой двойные системы, притом тесные двойные. Радиусы компонент в них были сравнимы с расстояниями между звездами. Но если так, возникал вопрос: какую роль в наступлении катастрофы играла вторая компонента?

Еще в 1848 г. французский небесный механик Э. Рош построил теорию движения частиц в системе с двумя неподвижными центрами притяжения. Если мы имеем систему двойной звезды, то мы можем выбрать систему координат так, чтобы одна из осей проходила через центры масс обеих звезд O_1 и O_2 (рис. 28). Пусть массы этих звезд равны M_1 и M_2 , а расстояние между ними R . Поскольку звезды — шары, мы можем считать, что их массы как бы сосредоточены в центрах масс O_1 и O_2 . Гравитационное поле этой системы можно наглядно представить системой поверхностей с равными значениями потенциала этого поля (эквипо-

тенциальных поверхностей). Напомним, что потенциал гравитационного поля одного тела равен

$$U = -f \frac{M}{r},$$

где f — постоянная тяготения, r — расстояние от центра масс тела с массой M . При наличии двух тел потенциалы их полей складываются:

$$U = -f \left(\frac{M_1}{r_1} + \frac{M_2}{r_2} \right).$$

Рош ввел понятие поверхности нулевой скорости. Частицы, движущиеся внутри такой поверхности со скоростями, меньшими некоторой предельной

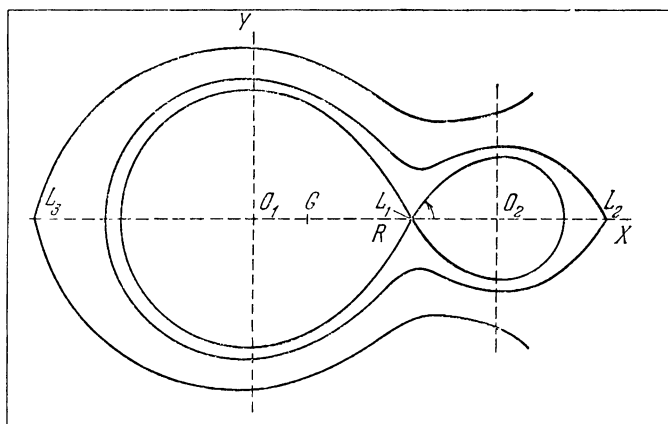


Рис. 28. Поверхности Роша.

(критической) скорости, никогда не выйдут за ее пределы. Форма поверхностей Роша зависит от постоянной Роша C :

$$C = \frac{2RU}{f(M_1 + M_2)}.$$

Пока постоянная Роша велика (т. е. расстояния r_1 , r_2 малы по сравнению с R), эквипотенциальные поверхности имеют форму двух замкнутых полостей, окружающих каждую из звезд в отдельности. Их форма сперва почти сферическая, затем, по мере убывания C , они начинают вытягиваться друг к другу носиками, и, наконец, при некото-

ром $C = C_0$ они соприкасаются в точке L_1 на оси (первой точке Лагранжа), и вся фигура напоминает песочные часы. При дальнейшем убывании C поверхность Роша охватывает обе звезды. Частицы, находящиеся внутри образованной ею полости, будут совершать очень сложные движения вокруг обеих звезд, не являясь спутниками какой-либо одной из них. Если взять еще меньшие значения C , то со стороны меньшего тела полость заострится в точке L_2 , а затем разомкнется. Потом то же самое произойдет со стороны большего тела в точке L_3 . Полость будет уже разомкнутой, и частицы смогут навсегда покинуть систему, не пересекая поверхности Роша.

А теперь представим себе реальную систему тесной двойной звезды. Поведение вещества, выброшенного одной из звезд, зависит от положения этой звезды по отношению к первой предельной поверхности Роша. Если каждая из звезд уместается внутри своей полости, система называется разделенной. Но и в такой системе возможен обмен масс через первую точку Лагранжа L_1 . Если же одна из звезд занимает всю свою полость, то такая система называется полуразделенной, и здесь достаточно ничтожных скоростей истечения вещества, чтобы оно покинуло звезду и «перетекло» через точку L_1 на другую компоненту. Наконец, может встретиться случай, когда обе звезды занимают полностью свои полости — такая система называется контактной. Близкой по ряду признаков к контактной системе является система затменной двойной β Лиры.

Как же, с учетом всего сказанного, должен был влиять на извержение новой ее спутник?

Несмотря на большое различие в параметрах систем бывших и повторных новых, описанных выше, радиусы красных компонент у них всегда того же порядка, что и расстояние между звездами. Поэтому Р. Крафт выдвинул гипотезу о том, что во всех случаях красная компонента заполняет одну из частей внутренней предельной поверхности Роша, так что мы имеем случай полуразделенной системы. Вещество истекает из красной звезды через точку Лагранжа L_1 и заполняет полость вокруг голубой звезды (рис. 28), которая гораздо меньше своей полости. Постепенно оно приобретает форму диска, лежащего в плоскости орбиты и вращающегося вокруг голубой звезды. Это вращение можно обнаружить по раздвоению эмиссионных линий, что четко наблюдается у DQ Геркулеса, а также у U Близнецов. Скорость вращения связана с динамическими постоян-

ными орбиты, и это может быть использовано для проверки значений масс компонент. Проверка подтвердила модель Крафта.

Но модель Крафта описывала состояние системы после вспышки и угасания звезды. Что же происходило в момент самой вспышки?

Для объяснения этого почти одновременно (в 1956 г.) были выдвинуты две гипотезы. Одну из них предложили американские астрофизики Дж. Кроуфорд и Р. Крафт, сперва для объяснения «вспыхивающей» переменной АЕ Водолея, которая тоже оказалась спектрально-двойной системой с периодом 16 часов 49 минут, состоящей из двух звезд-карликов: красной и голубой. Усиления блеска ее не так велики: всего в 2—4 раза, но происходят они очень быстро, за несколько минут.

Согласно гипотезе Кроуфорда и Крафта, голубая звезда уже истощила свои запасы водорода и целиком (за исключением внешней зоны толщиной около 100 км) состоит из вырожденного газа (см. стр. 87). Вещество красной звезды, богатое водородом, через точку Лагранжа L_1 «выливается» на голубую звезду, и оболочка ее обогащается водородом, который, достигая ядра звезды, начинает выгорать. Выход энергии растет, повышается и температура ядра, но оно не расширяется, как обычное вещество при нагревании, потому что в вырожденном газе уравнение состояния не зависит от температуры. При повышении температуры быстро растет и скорость ядерных реакций, и через некоторое время («время индукции») вырожденный газ полностью сжимается, происходит быстрое расширение звезды, т. е. взрыв.

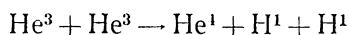
Такой механизм предложил еще в 1952 г. английский астроном Л. Местел для объяснения вспышек сверхновых звезд. При этом он учитывал, что из-за высокой теплопроводности электронного газа тепло будет отводиться в недра звезды и нагреваться будет все ядро, а не только периферические слои, куда попадает и где сгорает водород. Это обстоятельство приводило к идее центрального взрыва, которая годилась для сверхновых, но совсем не подходила для обычных новых, а тем более для повторных новых и вспыхивающих звезд.

С другой стороны, в этой гипотезе привлекало то, что для вспышки требовалось присутствие второй звезды, заполняющей свою полость поверхности Ронна и способной «изливать» свое вещество на вспыхивающую звезду. Хорошо объяснялись и повторные вспышки, если предпола-

гать, что электроны не успевают отводить тепло вглубь, а нагреваются именно периферические слои.

Но массы звезд ГК Персея (Новой 1901 г.) и Т Северной Короны были слишком велики для белых карликов, а потому нельзя было считать эти звезды вырожденными. Учтя все «за» и «против», Р. Крафт в 1964 г. отказался от этой гипотезы, получившей название гипотезы а к к р е ц и и.

Вторую гипотезу предложил французский астрофизик Эври Шацман, высказав ее на совещании по нестационарным звездам, проходившем в Бюраканской астрофизической обсерватории Академии наук Армянской ССР в сентябре 1956 г. За 15 лет до этого английский астрофизик Т. Каулинг показал, что в системе тесной двойной звезды отсутствие синхронности между вращением одной из компонент вокруг оси и обращением ее по орбите может вызвать нерадиальные колебания (явление, родственное приливам). Эти колебания могут попасть в резонанс с периодом орбитального движения и еще более усилиться. Амплитуда колебаний будет неограниченно расти. Повышение температуры в фазе сжатия приведет к ускорению реакции



выше критического уровня (такую возможность Шацман доказал еще в 1951 г.), что и явится причиной взрыва. Амплитуда нерадиальных колебаний максимальна в области «полярных шапок» звезды и в ее «экваториальном кольце» (в тесной двойной системе полярная ось направлена по прямой, соединяющей обе звезды). Таким образом, следует ожидать выбросов преимущественно в конусах, охватывающих «полярные шапки». Наблюдения Новой Геркулеса и некоторых других звезд подтверждали это предположение.

Э. Шацман развил свою гипотезу в ряде публикаций 1958—1959 гг.: он исследовал устойчивость нерадиальных колебаний сперва невращающейся, а затем вращающейся звезды, доказал, что колебания могут стать неустойчивыми, если источники энергии расположены достаточно близко к поверхности звезды, рассчитал амплитуды колебаний в зависимости от широты. Затем, исходя из скорости накопления содержания гелия, он показал, в каких случаях вспышка произойдет у полюсов или у экватора звезды и как будут чередоваться амплитуды вспышек.

При обсуждении доклада Шацмана в 1956 г. пулковский астроном В. А. Крат обратил его внимание на то, что в обо-

лочках новых существуют неоднородности, связанные с перемешиванием более горячих и более холодных масс. Кроме того, согласно исследованиям Э. Р. Мустеля, новые обладают заметным магнитным полем, что может оказать существенное влияние на характер колебаний, приводящих к взрыву.

Французский ученый учел это замечание советского астронома и в дальнейших работах попробовал объяснить изменения блеска вспыхивающих звезд электромагнитной активностью в их поверхностных слоях, связанной с турбулентными движениями в конвективной зоне. Но в отношении новых он по-прежнему поддерживал свою «резонансную» гипотезу. И хотя ее разделяло большинство ученых, она не давала полного ответа на все вопросы.

К середине 60-х годов положение с теорией вспышек новых несколько стабилизировалось. Теория движения ударных волн изнутри звезды наружу и отрыва оболочки была развита Д. К. Надёжиным и Д. А. Франк-Каменецким. Им удалось построить приближенную механическую модель вспышки новой и получить результаты, хорошо согласующиеся с наблюдениями. Так, для сравнительно массивной звезды ($3 M_{\odot}$) они получили время распространения ударной волны до поверхности около 15 минут, период пульсаций — вдвое больше, время расширения до максимального радиуса, т. е. время нарастания блеска до максимума, — около 10 часов. Для звезды типа DQ Геркулеса период пульсаций по этой модели получается десятки секунд, что и наблюдается.

Теория А. И. Лебединского и Л. Э. Гуревича, объясняющая механизм вспышки новой «накоплением» энергии ядерных реакций в периферических слоях звезды, и не противоречащая ей теория Э. Шацмана, выдвигающая в качестве причины такого накопления резонанс нерадиальных колебаний голубой звезды с орбитальным движением, молчаливо приняты на вооружение авторами учебников, монографий и обзоров. Но полной уверенности в том, что они правильно отражают действительность, еще нет.

Хуже всего пока обстоит дело с описанием процесса развития явлений перед максимумом и во время максимума блеска. В то время как В. Г. Горбачкий и И. Н. Минин продолжают разрабатывать гипотезу А (отрыв и расширение оболочки), Э. Р. Мустель твердо стоит на позициях гипотезы Б (расширение и спадание фотосферы). Авторы

монографий, обзоров и учебников вынуждены описывать обе гипотезы. И все же им легче, чем автору этой книги, которому приходится излагать здесь д е с я т к и гипотез. Но ничего не поделаешь: поставил себе задачу — пострайся ее выполнить.

Сверхновые звезды

31 августа 1885 г. астроном Тартуской (Дерптской) обсерватории Эрнст Гартвиг открыл новую звезду в туманности Андромеды. Звезда была 6,5 звездной величины и находилась близко от ядра туманности. Тогда не придали слишком большого значения этому открытию: наблюдались новые и поярче. Что касается близости к туманности Андромеды, то она могла быть случайной, а если звезда и была связана с туманностью, то ни расстояние до нее, ни ее физическая природа не были тогда известны.

Лишь в 1919 г. Кнут Лундмарк определил расстояние до туманности Андромеды — 650 000 световых лет (см. стр. 122). Стало ясно, что Новая Андромеды выделяется среди обычных новых. Ее светимость в максимуме превышала солнечную не в десятки тысяч раз, как у обычных новых, а по крайней мере в 100 миллионов раз *). Это позволило Лундмарку обосновать гипотезу о том, что изредка в других галактиках вспыхивают «гигантские новые», отличающиеся от обычных, как звезды-гиганты от звезд-карликов. Спустя 15 лет, в 1934 г., В. Бааде и Ф. Цвикки дали им укоренившиеся теперь, хотя и бессмысленное с точки зрения русского (да и любого другого) языка, название — с е р х н о в ы е.

Гипотеза Лундмарка была встречена в штыки даже такими авторитетами, как Харлоу Шепли. Последний считал, что Лундмарк ошибся в определении расстояния до туманности Андромеды, так как не м о ж е т б ы т ь таких ярких новых. Мы знаем, что Лундмарк действительно допустил ошибку, хотя как раз обратную той, какую ему приписывал Шепли: он з а н и з и л расстояние до туманности Андромеды, а не завысил, как считал Шепли.

Чтобы лучше обосновать свою точку зрения, Лундмарк стал собирать сведения о других новых, наблюдавшихся

*) Позже, в 1951 г., когда В. Бааде пересмотрел шкалу межгалактических расстояний, это число пришлось увеличить еще на целый порядок.

в спиральных, эллиптических и неправильных внегалактических туманностях (так называли тогда другие галактики). Между 1885 и 1920 гг. таких новых наблюдали десять. По блеску они нередко превосходили свою собственную галактику, что окончательно убедило Лундмарка в их особенной природе.

Подсчитав известное в то время число галактик и сравнив его с числом наблюдавшихся в них вспышек сверхновых, Лундмарк пришел к выводу, что это явление очень редкое и в каждой галактике происходит в среднем раз в тысячу лет.

Могли ли наблюдаться сверхновые в нашей Галактике? За весь период инструментальной астрономии такого не было ни разу. Ни одна из открытых за этот период новых не могла претендовать на причисление ее к классу сверхновых.

Лундмарк обратился к более ранним эпохам, вспомнил о Новой Кассиопеи, которую наблюдал в 1572 г. Тихо Браге, и о Новой Змееносца, наблюдавшейся в 1604 г. Кеплером. Обе они, судя по описаниям, могли быть сверхновыми. Лундмарк погрузился в чтение старинных китайских хроник, переведенных еще в XIX в. на европейские языки Э. Био и Э. Вильямсом, и обнаружил сообщение о вспышке в 1054 г. очень яркой звезды в созвездии Тельца, которая наверняка была сверхновой. Ее положение удалось установить с достаточной точностью. Выяснилось, что на этом месте находится яркая Крабовидная туманность — на этот раз настоящая газовая туманность, находящаяся в нашей Галактике. Уже в 1928 г. известный американский астроном Эдвин Хаббл (который как раз в эти годы привел окончательные доказательства того, что внегалактические туманности представляют собой далекие галактики, другие звездные системы, подобные Млечному Пути) высказал предположение, что Крабовидная туманность физически связана со вспышкой сверхновой 1054 г. Это предположение впоследствии полностью оправдалось.

Необходимо было накопить как можно больше наблюдательных материалов о сверхновых. Ждать, что такая звезда вспыхнет в нашей Галактике, не приходилось: можно было прождать и сто, и двести лет. Оставались другие галактики. Их было много, и вероятность «поймать» там вспышку сверхновой была больше. Начиная с 1933 г. американский астроном Фриц Цвикки предпринял систематическое фотографирование 175 площадок на небе, содержавших много

сравнительно близких галактик и скоплений более далеких галактик. Всего под «прицелом» оказалось около 3000 галактик ярче 15-й величины. В 1936 г. Цвикки получил для этой цели более мощный телескоп — 18-дюймовый телескоп системы Шмидта. За три года удалось получить 1625 снимков избранных областей неба, на которых было обнаружено 12 сверхновых. Естественно, что после обнаружения каждой сверхновой за ней велись тщательные систематические наблюдения, в том числе спектральные. Кроме Цвикки, в работе приняли участие В. Бааде, М. Хьюмсон и Р. Минковский.

Вторая мировая война прервала эту важную работу. В. Бааде использовал часть освободившегося времени, чтобы по материалам старых наблюдений, главным образом Тихо Браге и Кеплера, восстановить кривые блеска Сверхновых 1572 и 1604 гг. Это ему удалось без труда, так как записи обоих великих астрономов содержали все нужные сведения.

Уже по результатам первой серии патрулирования сверхновых можно было сделать вывод, что одна сверхновая вспыхивает в данной галактике в среднем раз в 400 лет. Недавние исследования американского астронома Дж. Тамманна показали, что средний интервал между вспышками сверхновых в крупных галактиках измеряется десятками лет.

В 1936—1937 гг. астрономы обсерватории Маунт Вилсон М. Хьюмсон, а затем Р. Минковский получили первые удачные спектры сверхновых, вспыхнувших в галактиках NGC 4273, IC 4182 и NGC 1003 *). Минковскому удалось для каждой сверхновой получить большую серию спектрограмм, причем для одной из них удалось захватить период за два дня до максимума. Последние спектры сверхновой в NGC 1003 были получены спустя 4 месяца, а в IC 4182 — спустя почти год после вспышки.

Как сами спектры, так и их изменения во времени у обеих сверхновых (как и у многих других, сфотографированных впоследствии) оказались очень схожи между собой и сильно отличались от спектров обычных новых. В них наблюдались широкие эмиссионные полосы, которые долго не удавалось отождествить. Во время максимума блеска никаких изменений в спектре не наблюдалось, зато спустя

*) Галактики и туманности принято обозначать номерами по каталогам: NGC — New General Catalogue («Новый общий каталог» Дрейера), IC — Index Catalogue (дополнение к NGC).

две недели в желтой и красной областях спектра наблюдались изменения: появление и исчезновение эмиссионных полос, тогда как синяя часть оставалась неизменной. В дальнейшем происходили изменения распределения яркости в спектре. Две полосы удалось отождествить с сильно расширенными запрещенными линиями кислорода, которые наблюдаются в спектре полярных сияний.

В 1940 г. Р. Минковский получил спектр еще одной сверхновой (в галактике NGC 4725), резко отличавшийся от остальных. Спустя год был получен почти такой же спектр у сверхновой в галактике NGC 4559. Это дало Минковскому основание разделить сверхновые на два типа: тип I, к которому относятся звезды, наблюдавшиеся в галактиках NGC 1003, IC 4182 и в ряде других, а также Сверхновые Тихо Браге и Кеплера (это было установлено путем сравнения кривых блеска), и тип II, к которому принадлежат сверхновые в NGC 4725 и 4559, а также некоторые другие.

Спектры сверхновых II типа имеют интенсивный непрерывный фон с очень ярким ультрафиолетовым концом, соответствующий температуре излучения $40\,000^\circ$, как у горячих звезд класса O. Никаких полос излучения или поглощения в спектре в период максимума не наблюдается. Лишь через неделю появляется слабая эмиссионная полоса в красной части, а позже непрерывный спектр слабеет, зато появляются широкие полосы излучения и поглощения, принадлежащие водороду, гелию и другим элементам.

Спектры сверхновых I типа удалось расшифровать лишь Д. Мак-Лафлину в 1963 г. Полосы излучения и поглощения принадлежали в основном гелию, а также ионам углерода, кислорода, кремния и азота, но были сильно смещены к фиолетовому концу. Эти смещения соответствовали скоростям приближения газовых оболочек к наблюдателю в 6—8 тысяч км/сек, т. е. в несколько раз большим, чем у новых звезд.

Между прочим, для определения скоростей расширения газовых оболочек не требовалось отождествления полос — эти скорости были установлены намного раньше по ширине полос. Ведь только часть газа движется на нас, другие части движутся в стороны, а также назад (когда оболочка становится много больше самой звезды, мы видим и ее, так сказать, заднюю сторону). Массы газа, движущиеся от нас, дают смещение полос к красному концу, в результате мы наблюдаем расширение полос.

Зная светимость сверхновых в максимуме и ее изменение во времени, нетрудно было подсчитать энергию вспышки сверхновых — она составляла 10^{49} — 10^{51} эрг, т. е. была в 100 000 раз больше, чем у обычных novae (такую энергию наше Солнце излучает за 10^8 — 10^{10} лет!). Но скорость разлета газов у сверхновых была только в 3—4 раза больше, чем у novae. Отсюда можно было рассчитать, что масса сброшенной оболочки составляла не (10^{-1} ÷ 10^{-5}) M_{\odot} , как у novae, а порядка одной солнечной массы. Радиус оболочки сверхновой около максимума ее блеска должен был в пять раз превосходить радиус орбиты Плутона. «Несомненно, что вспышка сверхновой связана с переходом звезды из одного состояния в другое, существенно отличное от первого, — писал в 1939 г. В. А. Амбарцумян. — Надо надеяться, что ближайшие годы дадут нам возможность собрать необходимый наблюдательный материал по этому вопросу».

И действительно, с середины 50-х годов наблюдательный материал начал накапливаться все возрастающими темпами. Если с 1885 г. до 1956 г. удалось наблюдать 54 сверхновых, то за семилетие 1956—1963 гг. их было сфотографировано 82, а за 1964—1970 гг. — 106. Возобновились под руководством Цвикки патрулирование сверхновых на обсерватории Маунт Паломар, на этот раз на 48-дюймовом телескопе Шмидта. Немало сверхновых открыли советские астрономы, в частности, П. Г. Куликовский, Г. В. Зайцева, Т. И. Грызунова (Москва), А. Д. Чуадзе, Г. Н. Кимеридзе (Абастумани), С. Г. Искусдарян (Бюракан). На Крымской, Абастуманской и Бюраканской обсерваториях организована Служба сверхновых, к которой присоединились обсерватории в Таутенбурге (ГДР) и Будапеште (Венгрия). Много сверхновых открыл швейцарский астроном П. Вильд.

Как же можно было объяснить взрыв сверхновых? И чем отличались друг от друга сверхновые I и II типа? Таковы были основные задачи, вставшие перед астрономии-теоретиками.

Первую попытку теоретически объяснить явление сверхновых сделал Ф. Цвикки в серии работ, начатой в 1934 г. По мнению Цвикки, поддержанному Бааде, быстрое освобождение огромного количества энергии связано с превращением обычной звезды, исчерпавшей свои источники энергии (какие именно, тогда еще известно не было!), в сверхплотную нейтронную звезду. Да, Цвикки высказал эту идею еще до работ Л. Д. Ландау, Р. Оппенгеймера и Г. М. Волкова,

в которых была строго доказана возможность и выведены условия такого перехода. Бааде и Цвикки высказали тогда еще одну гипотезу, впоследствии полностью подтвердившуюся, но о ней мы расскажем позже.

Гипотеза Цвикки в течение многих лет была практически единственной, которая могла объяснить, хотя бы качественно, взрыв сверхновой. Ее популярности способствовала работа С. Чандрасекара, который в 1935 г. пришел к выводу, что звезды с массой, большей $5,7 M_{\odot}/\bar{\mu}$ ($\bar{\mu}$ — средний молекулярный вес вещества звезды), не могут при сжатии образовать вырожденное ядро и должны «избавиться» от избытка массы путем ее выброса. В пользу гипотезы Цвикки говорило и большое смещение ярких полос в синей части спектра к красному концу, которое обнаружил Р. Минковский. Ф. Цвикки считал, что это смещение вызвано не эффектом Доплера, а эффектом Эйнштейна — в сильном гравитационном поле, согласно общей теории относительности, должно происходить (и происходит) именно такое смещение. Величина смещения говорила за то, что мы имеем дело с мощным гравитационным полем, сильнее, чем у белых карликов, что как раз соответствовало предполагаемым нейтронным звездам.

За первые 15 лет со времени выдвижения гипотезы Цвикки теория вспышек сверхновых продвинулась слабо. «Прежде чем сколько-нибудь удовлетворительная теория происхождения сверхновых сможет быть выдвинута, само явление должно быть изучено несравненно полнее, чем это имеет место сейчас», — так писал в 1948 г. известный исследователь новых звезд профессор Б. А. Воронцов-Вельяминов. Это высказывание почти не отличается от того, которое сделал в связи с этой же проблемой В. А. Амбарцумян десятилетием раньше.

А спустя еще год было сделано важное открытие, давшее в руки астрономов новый мощный источник информации о небесных телах вообще и о сверхновых звездах в частности. Было открыто радиоизлучение Крабовидной туманности.

Крабовидная туманность радирует...

Связь Крабовидной туманности (рис. 29) со сверхновой 1054 г. была заподозрена еще в 1928 г. Не удивительно, что группа американских астрономов, работавшая под руководством В. Бааде, уделила этой туманности самое пристальное внимание. Сам Бааде получил превосходные

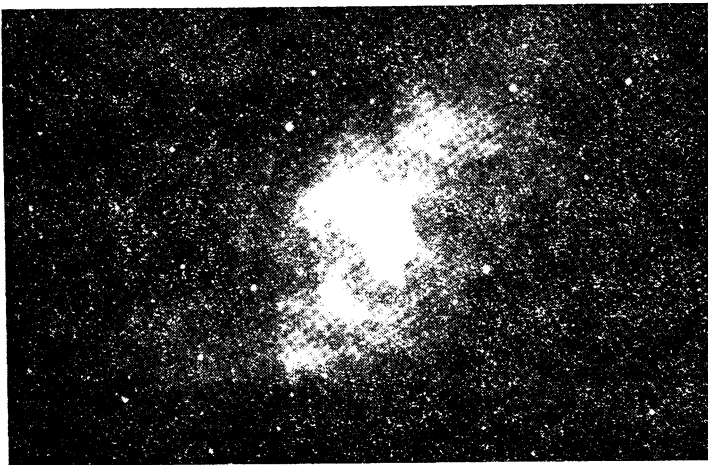
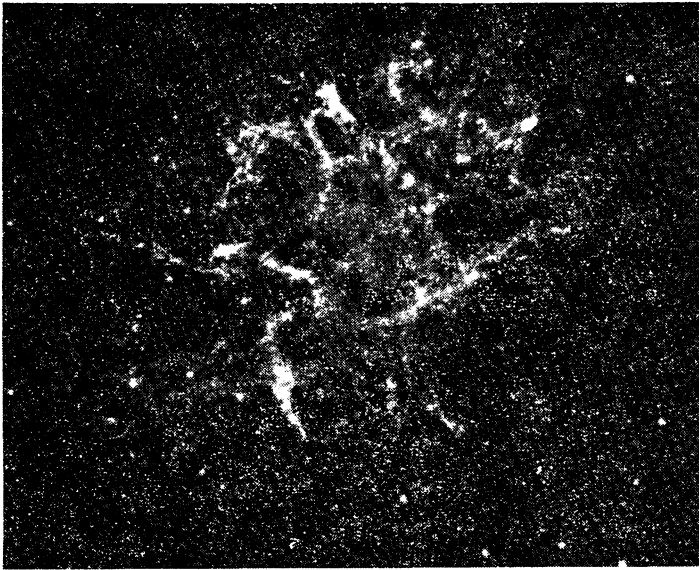


Рис. 29. Крабовидная туманность: вверху — в лучах водорода, внизу — в общих лучах.

снимки туманности в разных участках спектра, Р. Минковский снял серию спектров. На снимках резко выделилась система волокон (в красной области спектра, где имеется мощная линия водорода H_α) и окружающая ее аморфная масса, излучавшая 80% света всей туманности и имевшая непрерывный спектр. Наоборот, волокна, кроме лишней водорода, давали линии гелия, ионов кислорода, неона и серы.

Сравнение снимков, полученных с интервалом в несколько лет, показало, что туманность медленно расширяется — на 0,2 секунды дуги в год. Изучение спектров показало, что линии смещены и даже раздвоены из-за движения газа к нам и от нас со скоростью 1300 км/сек. Это давало возможность определить расстояние до туманности. Действительно, 1300 км/сек соответствует $4 \cdot 10^{10}$ км/год. Значит, на расстоянии туманности отрезок в $4 \cdot 10^{10}$ км виден под углом 0,2 секунды дуги. Отсюда расстояние до нее составляло $4 \cdot 10^{16}$ км, или 4000 световых лет. Чтобы на таком расстоянии звезда, вспыхнувшая в 1054 г., казалась ярче Венеры, она должна была по крайней мере в 400 миллионов раз превышать по светимости Солнце. Значит, это действительно была сверхновая.

В центре туманности была обнаружена слабая звездочка 16-й величины. Ее блеск в 600 раз уступал блеску туманности. За счет чего же светилась туманность? Сама по себе она светиться не может, ее свечение должно возбуждаться излучением какой-либо горячей звезды или звезд. Особенно загадочным был непрерывный спектр аморфной массы. Разреженные газы должны давать линейчатый спектр — такой спектр давали волокна. Может быть, это космическая пыль? Но пыль может только рассеивать, отражать свет центральной звезды, поэтому пылевая туманность не могла быть ярче самой звезды. Значит, это не пыль.

Но, может быть, существуют условия, при которых и газы дают непрерывный спектр? Да, такой спектр дает горячий, сильно ионизованный газ (плазма) при достаточно высокой плотности. Тут могут иметь место два процесса. Во-первых, свободные электроны (имеющие непрерывный спектр энергий) рекомбинируют с ионами, отдавая избыток энергии в виде излучения. Во-вторых, перемещаясь в поле ионов, электроны могут тормозиться, опять-таки отдавая часть энергии путем излучения. Эти два вида излучения называются рекомбинационным и тормозным.

Р. Минковский предложил в 1942 г. именно такое истолкование непрерывного спектра аморфной составляющей

Крабовидной туманности. В этом случае распределение энергии в спектре приводило к значению электронной температуры *) туманности $50\,000^\circ$ и электронной плотности 10^3 эл см³. Но так как в среднем на один электрон должен приходится один ион (чтобы плазма была квазинейтральной, иначе кулоновское отталкивание частиц одного заряда сделает ее неустойчивой), общая средняя плотность туманности получалась 10^{-21} г/см³. Поскольку размеры ее были известны (радиус — 2 световых года, или $2 \cdot 10^{18}$ см), отсюда получалась масса туманности: $3 \cdot 10^{31}$ г, или $15 M_\odot$. Значит, и масса сверхновой перед вспышкой была не меньше.

Но гипотеза Минковского предъявляла очень жесткие требования к свойствам центральной звезды. Чтобы поддерживать излучение туманности при столь высокой температуре, сама звезда, как показали расчеты Минковского, должна была иметь температуру в $500\,000^\circ$! Звезд с такими температурами астрономия не знала: самые горячие (ядра планетарных туманностей) имели температуры до $100\,000^\circ$.

Это было, однако, еще не все. Чтобы пополють расход энергии туманности ($1,3 \cdot 10^{36}$ эрг/сек), звезда должна была «накачивать» в нее столько же энергии, а поэтому ее светимость должна была по крайней мере в 300 раз превосходить светимость Солнца. Но туманность прозрачна, и в ней может задерживаться не более одного процента излучения звезды — значит, светимость звезды была в 30 000 раз больше солнечной. С учетом температуры это приводило к выводу, что звезда — белый карлик с радиусом в 50 раз меньше солнечного (вдвое больше нашей Земли) и со средней плотностью в 180 000 раз больше, чем у Солнца.

Как же примирить полученную высокую светимость с тем фактом, что звезда была только 16-й величины? Перенесенная на место Солнца, она имела бы примерно такую же светимость, как и наше дневное светило. Минковский обобщил это затруднение ссылкой на то, что при температуре $500\,000^\circ$ основная часть излучения лежит в области рентгеновских и ультрафиолетовых лучей, не воспринимаемых глазом и фотопластинкой.

И все же гипотеза Минковского, излагавшаяся в учебниках астрофизики 40-х и 50-х годов как наиболее вероят-

*) Электронной температурой называется кинетическая температура электронного газа. Она может не совпадать с температурой ионного газа и нейтральной компоненты из-за большого различия масс электронов и тяжелых частиц.

ная, была в дальнейшем полностью опровергнута в результате исследований советского ученого И. С. Шкловского. Вот как это произошло.

В 1949 г. австралийские радиоастрономы Дж. Болтон и Дж. Стенли обнаружили, что Крабовидная туманность является одним из самых мощных источников космического радиоизлучения. Им удалось измерить поток излучения туманности на метровых волнах: от 7,5 до 1,9 м. Поток как будто оставался постоянным в этих пределах длины волны, тогда как у других радионисточников, связанных с некоторыми галактиками, поток заметно убывал с частотой.

Вскоре две группы американских радиоастрономов измерили поток излучения Крабовидной туманности на волнах 21 и 9,4 см. На сантиметровом диапазоне обнаружилось ослабевание потока с частотой, т. е. с уменьшением длины волны.

Располагая лишь этими данными, молодой теоретик И. С. Шкловский, в 30 лет получивший степень доктора физико-математических наук, поставил перед собой задачу: объяснить происхождение радиоизлучения Крабовидной туманности.

Радиоизлучение туманности могло быть тепловым и нетепловым. Тепловое радиоизлучение имеет ту же природу, что и излучение нагретого тела в других диапазонах длины волны, и объясняется в основном тормозным излучением электронов в поле ионов^{*)}. Первые предположения сводились к тому, что радиоизлучение Крабовидной туманности — тепловое, т. е. представляет собой длинноволновой «хвост» оптического излучения.

Два возражения против такого предположения, приведенные И. С. Шкловским (а также некоторыми другими учеными), показали его нереальность. Во-первых, если радиоизлучение Крабовидной туманности — тепловое, температура ее аморфной массы должна быть не менее 40 миллионов градусов вместо 50 тысяч по Минковскому, а плотность электронов $5 \cdot 10^4$, а не 10^3 эл/см³. Во-вторых, интенсивность непрерывного спектра теплового излучения меняется вдоль спектра по хорошо известному закону и, в расчете на единичный интервал частот, должна быть в

^{*)} Так как при этом электрон переходит из одного энергетического состояния относительно иона в другое, оставаясь свободным, этот процесс принято называть свободно-свободными переходами.

видимой области лишь втрое меньше, чем в радиодиапазоне. На самом деле с переходом к видимой области интенсивность ослабевала не в три, а в 1200 раз.

Значит, радионизлучение Крабовидной туманности — нетепловое, т. е. имеет электромагнитное происхождение. Два процесса могут быть его причиной: плазменные колебания и торможение очень быстрых (релятивистских) электронов в магнитных полях.

Механизм плазменных колебаний был предложен самим И. С. Шкловским еще в 1946 г. и применен для объяснения радиовсплесков, связанных со вспышками на Солнце. Казалось бы, его можно было применить и здесь: плазма налицо, колебания в ней вполне возможны: их могут возбуждать хотя бы потоки быстрых заряженных частиц, выброшенных сверхновой.

Но подсчеты показали, что этот механизм не может играть здесь какой-либо роли. Частоты плазменных колебаний в десятки и сотни раз меньше тех частот, на которых было принято радионизлучение Крабовидной туманности *). Кроме того, не было обнаружено никакой связи между распределением яркости туманности в видимых и радиолучах.

Оставался один реальный механизм — торможение релятивистских электронов в магнитном поле. Напомним, что электрон принято называть релятивистским, если его кинетическая энергия $E_{кин}$ гораздо больше энергии покоя, равной, согласно формуле Эйнштейна, m_0c^2 . Подставляя массу покоя электрона $m_0 = 9 \cdot 10^{-28}$ г, квадрат скорости света $c^2 = 9 \cdot 10^{20}$ см²/сек² получим: $E_{кин} \gg 8 \cdot 10^{-7}$ эрг = $= 5 \cdot 10^5$ эв = 0,5 Мэв. Итак, релятивистскими следует считать электроны, имеющие энергию хотя бы в несколько мегаэлектрон-вольт.

Может показаться, что таких электронов вообще не бывает. В самом деле, скорость электрона ни при каких условиях не может достигнуть скорости света, а значит, его кинетическая энергия $mv^2/2 < m_0c^2$. Те из читателей, кто так рассуждает, забывают об одном из важнейших выводов теории относительности, согласно которому масса частицы, летящей с большой скоростью, возрастает тем силь-

*) Для читателей — любителей радио скажем, что радионизлучение Крабовидной туманности наблюдается теперь в диапазоне от 12,5 до 94 000 мегагерц, тогда как частота возможных плазменных колебаний — от 2 до 5 мегагерц.

нее, чем ближе ее скорость к скорости света. Поэтому формула для E выглядит так:

$$E_{\text{кин}} = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \approx \frac{m_0 v^2}{2} \left(1 + \frac{3}{4} \frac{v^2}{c^2} + \dots \right).$$

Теперь из условия $E_{\text{кин}} \gg m_0 c^2$ легко подсчитать, что релятивистские электроны должны иметь скорости больше 90% скорости света.

Гипотеза о том, что релятивистские электроны могут быть причиной космического радиоизлучения, была предложена в 1950 г. двумя шведскими учеными: астрофизиком и космогонистом Х. Альвеном и радиоастрономом Н. Герлофсоном. Но в их работе использовались неточные формулы и задача была поставлена, мягко выражаясь, не вполне корректно. Лишь в следующем году правильную теорию космического радиоизлучения, основанную на этом механизме, разработали два советских ученых: известный физик, член-корреспондент АН СССР (теперь академик) В. Л. Гинзбург и молодой радиоастроном Г. Г. Гетманцев. Еще через два года И. С. Шкловский применил ее к объяснению радиоизлучения Крабовидной туманности.

В отличие от обычного электрона, движущегося в магнитном поле, релятивистский электрон излучает не на одной частоте, а в непрерывном спектре частот. Это излучение имеет максимум на частотах порядка $H (E/mc^2)^2 \text{ МГц}$ (H — напряженность магнитного поля). Чему же равна H ?

В том, что межзвездные магнитные поля существуют, в то время не было никаких сомнений. Об этом говорили и причудливые формы волокнистых туманностей (рис. 30), в которых ионизованные атомы располагались вдоль магнитных силовых линий, и наблюдения поляризации света далеких звезд, возникшей в результате процессов рассеяния на межзвездных пылинках, ориентированных в магнитном поле, и теоретические соображения.

Действительно, из самых общих соображений магнитной гидродинамики следовало, что в ионизованном газе с турбулентными движениями должно быть магнитное поле — поле, создаваемое движущимися зарядами. Можно было оценить и напряженность этого поля, если положить, что вся энергия движения заряженных частиц в единице объема переходит в энергию магнитного поля:

$$\frac{\rho v_l^2}{2} = \frac{H^2}{8\pi}.$$

При плотности вещества волокон туманности $\rho = 5 \cdot 10^{-22} \text{ г см}^3$ и скоростях турбулентных движений в Крабовидной туманности $v_t = 300 \text{ км/сек} = 3 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$ (незадолго до того обнаруженных из спектральных наблюдений) получалось $H = 10^3$ эрстеда. Поскольку не вся



Рис. 30. Волокнистая туманность «Гамма» в созвездии Возничего.

энергия турбулентности шла на поддержание магнитного поля, можно было принять $H = 10^{-1}$ эрстеда.

При таком значении напряженности магнитного поля в Крабовидной туманности для обеспечения наблюдаемого спектра ее радионизлучения требовались релятивистские электроны с энергиями от 30 до 3000 Мэв. В том, что такие электроны действительно существуют, сомневаться

не приходилось: они проникали и к нам на Землю в составе космических лучей, с которыми мы скоро познакомимся. Расчет показал, что концентрация этих электронов, необходимая, чтобы обеспечить наблюдаемый поток радионизлучения Крабовидной туманности, требовалась совсем ничтожная: 10^{-5} эл./см³, или 10 электронов на один кубический метр.

Итак, теория была построена. Но ее надо было проверить наблюдениями. И прежде всего нужно было выяснить, объясняется ли свечение аморфной массы тем же механизмом, что и радионизлучение, т. е. торможением релятивистских электронов. В конце 1954 г. пулковский радиоастроном

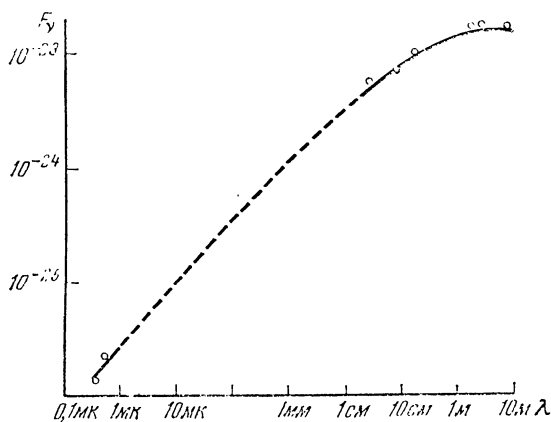


Рис. 31. Спектр излучения Крабовидной туманности.

Н. Л. Кайдановский и аспирант И. С. Шкловского Н. С. Кардашев измерили поток радионизлучения Крабовидной туманности на волне 3,2 см (самой короткой волне, применявшейся в то время) — на график спектра излучения туманности (рис. 31) легла новая, очень важная точка. Нанеся на этот график значения потока излучения в оптическом диапазоне, И. С. Шкловский получил плавную кривую, ход которой соответствовал теоретической закономерности.

Но этого было еще недостаточно для подтверждения теории. Нужно было на основе этой теории предсказать новые, еще не известные эффекты и обнаружить их. Такое предсказание было сделано советским астрофизиком И. М. Гордоном вскоре после опубликования работы И. С. Шкловского.

Излучение, вызванное релятивистскими электронами, движущимися по орбитам в магнитных полях, как в гигантском синхротроне (его так и называли: с и н х р о т р о н и н о e), должно быть поляризовано.

Осенью 1953 г. ленинградский астроном В. А. Домбровский организовал на Бюраканской обсерватории фотоэлектрические наблюдения поляризации света Крабовидной туманности. Такие же наблюдения, но фотографическим методом провел на Абастуманской обсерватории М. А. Вашакидзе. Обе серии наблюдений дали близкие результаты: была обнаружена заметная степень поляризации — 13%. Характер поляризации в различных частях туманности был подробно изучен в 1955 г. на Крымской и Бюраканской обсерваториях, а затем на Лейденской обсерватории в Голландии. Стало ясно, что поляризация образуется в самой туманности, а не за счет рассеяния излучения на межзвездных пылинках, как поляризация света звезд.

После обнаружения поляризации видимого излучения Крабовидной туманности астрономы стали искать поляризацию ее радиоизлучения. Первая попытка, предпринятая в 1956 г. голландским астрономом Г. Вестерхаутом на волне 21 см, потерпела неудачу — поляризацию обнаружить не удалось. Но это отнюдь не опровергало теорию Шкловского: была известна причина, из-за которой поляризация радиоизлучения могла и не быть обнаружена. Причина эта состояла в том, что в магнитном поле плоскость поляризации электромагнитной волны поворачивается, причем угол поворота обратно пропорционален квадрату частоты. Явление это было открыто еще в 1846 г. М. Фарадеем и получило название фарадеевского вращения плоскости поляризации. Ввиду того, что магнитное поле туманности сильно запутано, лучи, исходящие из разных ее частей, испытывают различное по величине фарадеевское вращение, и суммарное излучение оказывается деполаризованным. Но на высоких частотах действие фарадеевского вращения быстро убывает, и можно было надеяться именно здесь обнаружить поляризацию радиоизлучения Крабовидной туманности.

Это предположение оправдалось. В 1957 г. на 16-метровом радиотелескопе Морской исследовательской лаборатории в Вашингтоне удалось обнаружить поляризацию излучения туманности на волне 3 см. Спустя 2 года А. Д. Кузьмин и В. А. Удадьцов с помощью 30-метрового радиотелескопа Крымской станции Физического института АН СССР

им. П. Н. Лебедева зарегистрировали поляризацию излучения Крабовидной туманности на волне 10 см, а в 1963 г. удалось измерить поляризацию и на волне 22 см. Правда, степень поляризации убывала с длиной волны, но этого и следовало ожидать, учитывая деполяризующее действие фарадеевского вращения.

Таким образом, теория И. С. Шкловского получила полное подтверждение, и не только на примере Крабовидной туманности, но и ряда других туманностей — остатков вспышек сверхновых.

(Сейчас нам придется на время проститься с Крабовидной туманностью. Но читатель должен знать, что за последние 10 лет она преподнесла ученым еще не один сюрприз. В 1963 г. было установлено, что она является источником рентгеновского излучения. А в 1968 г. в ней был открыт пульсар*.)

В 1948 г. английские радиоастрономы М. Райл и Ф. Смит обнаружили очень мощный источник в Кассиопее, получивший название Кассиопея А, а в 1951 г. Бааде и Минковский отождествили его с пекулярной (т. е. имеющей какие-то особенности) туманностью. Радиоспектр этого источника в интервале частот 15—10 000 Мгц напоминал радиоспектр Крабовидной туманности, хотя его интенсивность быстрее убывала с частотой. Тонкая структура радиоисточника показывала, что он состоит из ряда концентрических оболочек и нескольких конденсаций. Все эти факты говорили в пользу предположения, выдвинутого в 1952 г. П. П. Паренаго и И. С. Шкловским, о том, что этот источник и связанная с ним туманность — остатки вспышки сверхновой. Но какой именно? Используя переводы китайских хроник, опубликованные в XIX в. Э. Био и Э. Вильямсом, И. С. Шкловский и П. П. Паренаго отождествили Кассиопею А со сверхновой 369 г., вспыхнувшей, по китайским наблюдениям, как раз в созвездии Кассиопеи.

Но материалов Био и Вильямса было недостаточно. В ноябре 1953 г. по просьбе И. С. Шкловского Комиссия по истории астрономии при Академии наук СССР обратилась к Академии наук КНР с просьбой организовать изучение древних китайских хроник с целью выявления новых данных о когда-то вспыхивавших новых и сверхновых звездах. Китайские астрономы внимательно отнеслись к просьбе советских ученых (до «культурной революции»

*) См. литературу, указанную в сноске на стр. 92.

было еще далеко). Работа была поручена аспиранту Си Цзэ-цуну, который обнаружил на протяжении 18 столетий со 134 г. до н. э. записи о вспышках 35 новых звезд (китайцы называли их «звезды-госты»). Часть их не была известна европейцам, другие дополняли уже известные наблюдения. Выяснилось, что Сверхновые Тихо 1572 г. и Кеплера 1604 г. наблюдались также и в Китае. Из 35 звезд шесть можно было считать сверхновыми; они вспыхивали в 185, 369, 1006, 1054, 1572 и 1604 гг.

В 1958 г. Р. Минковский изучил собственные движения конденсаций в туманности Кассиопея А и установил, что она расширяется, причем так, что расширение началось где-то около 1700 г. Именно тогда, по-видимому, и вспыхнула сверхновая. Значит, Кассиопея А — самый молодой радиосточник, связанный со вспышкой сверхновой, и прежнее отождествление его со сверхновой 369 г. было ошибочно.

Однако ни в 1700 г., ни в ближайшие к нему годы и даже десятилетия никто вспышку сверхновой в созвездии Кассиопеи не наблюдал. Как это можно было объяснить? Созвездие Кассиопеи в Европе никогда не заходит, астрономия в те времена находилась на достаточно высоком уровне, пасмурная погода не могла стоять на территории всей Европы в течение нескольких месяцев. Наиболее разумное объяснение этого парадокса предложил И. С. Шкловский. Разгадка, по его мнению, состоит в межзвездном поглощении света.

Расстояние до Кассиопеи А — около 10 тысяч световых лет. Если между нами и сверхновой расположены облака межзвездной пыли и газа, то в принципе возможно ослабление блеска звезды даже в 1000 раз. В пользу этого предположения говорят некоторые особенности спектра туманности: при наличии довольно интенсивных линий кислорода в красной части спектра линия пониженоанного кислорода в синей части совсем не видна. Но, как известно, межзвездное поглощение намного больше в синей части спектра, чем в красной. Если даже сверхновая при вспышке имела бы (при отсутствии поглощения) блеск — 3,5 звездной величины, из-за поглощения света она могла казаться лишь 4-й величины и осталась незамеченной.

Были обнаружены и туманности — остатки сверхновых 1572 и 1604 гг. Удалось найти характерные признаки, отличающие остатки сверхновых I типа (в том числе 1054, 1572 и 1604 гг.) от остатков вспышки сверхновых II типа (типичный представитель — Кассиопея А).

После того как природа свечения оболочек стала ясной, можно было оценить и их массу. Плотность аморфной составляющей Крабовидной туманности получилась около 10^{-24} г/см³, а масса — около $0,05 M_{\odot}$. Волокнистая составляющая была в 500 раз плотнее, т. е. масса ее была тоже $0,05 M_{\odot}$. Вся масса туманности составляла, таким образом, $0,1 M_{\odot}$, а вовсе не $15 M_{\odot}$, как получили, исходя из неверных представлений о механизме свечения аморфной массы, Бааде и Минковский. Таким образом, сверхновые I типа, обладая до взрыва массой порядка $1-2 M_{\odot}$ (характерной для звезд сферической подсистемы Галактики), выбрасывают сравнительно небольшую долю своей массы.

Другое дело — сверхновые II типа. Их остатки образуют протяженные волокнистые туманности, примером которых являются знаменитая «петля» в Лебеде или «Гамак» в Возничем (см. рис. 30). Изучение расширения этих туманностей показало, что их возраст исчисляется десятилетиями тысяч лет, а массы — порядка $10 M_{\odot}$. Таким образом, сверхновые II типа — массивные и скорее всего молодые звезды, выбрасывающие при взрыве большую часть своей массы.

К вопросу о природе взрыва тех и других сверхновых мы еще вернемся, а пока нам придется временно оставить сверхновые и заняться другим явлением природы, которое ученые начали изучать задолго до сверхновых и которое на первый взгляд не имело к последним никакого отношения. Но — только на первый взгляд.

Космические лучи

В 1911—1912 гг. австрийский ученый В. Ф. Гесс, изучая влияние радиоактивности почвы на ионизацию воздуха, произвел ряд измерений ионизации с воздушных шаров до высоты 5200 м. К его удивлению, выше 1500 м ионизация воздуха не убывала, как следовало ожидать в предположении, что она целиком вызывается радиоактивностью почвы, а возрастала. Этот результат был подтвержден в 1913—1914 гг. немецким исследователем В. Кольхерстером, который довел измерения до высоты 9300 м. Гесс и Кольхерстер сделали заключение, что источник ионизации — особые лучи, приходящие из космического пространства и имеющие еще большую энергию, чем гамма-лучи, которые выделяются при радиоактивном распаде. Интенсивность этих лучей,

получивших название *космических*, на высоте 9300 м примерно в 25 раз превосходила интенсивность гамма-лучей у поверхности. Эксперименты, проведенные в 20-х годах американским физиком Р. Миллиkenом и советскими физиками Л. В. Мысовским и Л. Р. Тувимом, позволили определить проникающую способность космических лучей, которую Милликен оценил в 10 раз больше, чем у гамма-лучей. Милликен пытался, исходя из этого, вычислять длину волны нового вида излучения. Она получалась примерно от 2 до 5 стомиллионных долей микрона (0,0002—0,0005 Å). Энергия квантов этих лучей измерялась миллиардами электрон-вольт (сокращенное обозначение: 10^9 эв = 1 Бэв).

В 1927 г. ленинградский профессор (теперь академик) Д. В. Скобельцын изучал с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитном поле, траектории электронов, выбитых гамма-лучами из атомов газа, заполнявшего камеру. Опыты Скобельцына отчетливо показали, что из космоса к нам приходят заряженные частицы очень большой энергии. Через два года немецкие физики В. Боте и В. Кольхерстер, применив блоки счетчиков Гейгера — Мюллера, окончательно установили, что космические лучи в действительности представляют собой не новый вид излучения, а заряженные частицы высоких энергий. Именно в космических лучах в 1932 г. американский физик К. Андерсон впервые обнаружил позитрон, а в 1937 г. К. Андерсон и С. Нидермейер открыли мю-мезон.

Несмотря на эти новые результаты, Р. Милликен до середины 30-х годов придерживался мнения, что первичная компонента космических лучей — всё же фотоны очень жесткого излучения, а частицы, регистрируемые в экспериментах Боте—Кольхерстера и Андерсона, — вторичные, вызванные расколом атомных ядер этими фотонами. Милликен же высказал одну из первых гипотез о происхождении космических лучей. По его мнению, эти лучи образуются не в звездах, а скорее — в межзвездном пространстве, за счет образования там тяжелых элементов из водорода. В качестве аргумента он приводил колоссальную энергию космических лучей, намного превосходившую кинетическую энергию атомов в недрах звезд.

Джемс Джинс остро критиковал гипотезу Милликеана. В ответ Милликен с улыбкой возражал: «Если Джемс Джинс придерживается одного взгляда, а я другого, то никто не может сказать, кто из нас прав. Единственное,

в чем можно быть совершенно уверенным, это в том, что он и я об этом ничего не знаем». Увы, в этом Милликен был совершенно прав.

К концу 30-х годов стало ясно, что космические лучи состоят из двух компонент: мягкой и жесткой. В состав мягкой компоненты входили электроны, позитроны и фотоны с энергиями 10^6 — 10^{10} эв, в состав жесткой — в основном мю-мезоны. Исследования многих ученых, в том числе французского физика Л. Оже, советских физиков А. Б. Верриго, С. Н. Вернова и других, показали, что в атмосфере, на высотах примерно 15—20 км, происходит образование «ливней» частиц в результате взаимодействия каких-то первичных частиц с атомами и молекулами воздуха. Природа первичных космических лучей в те годы была еще неясна. Лишь в 1948 г. опыты А. И. Алиханова, А. И. Алиханяна и их сотрудников показали, что в составе жесткой компоненты имеется заметная доля протонов, которая быстро растет с высотой. В верхних слоях атмосферы частицы космических лучей — в основном протоны, хотя кроме них встречаются и ядра тяжелых атомов: альфа-частицы (ядра атомов гелия) и еще более тяжелые.

Таким образом, лишь к 1948 г. стал ясен состав первичных космических лучей и можно было всерьез подумать об их происхождении.

Замечательно, что исследование космических лучей привело к кардинальным открытиям в самых различных областях знания — в физике, геофизике и астрономии. С 1929 до 1956 г. изучение космических лучей было единственным способом исследования элементарных частиц высоких энергий. Даже после 1956 г., когда вступили в строй мощные современные ускорители заряженных частиц, позволившие разгонять частицы до энергий в 10^{10} эв, космические лучи сохранили полную монополию на еще более энергичные частицы — до 10^{19} эв!

Изучение взаимодействия первичных космических лучей с магнитным полем Земли явилось прекрасным способом выяснения свойств этого поля и целого ряда эффектов, имевших геомагнитное происхождение.

Наконец, поиски источников космических лучей привели к открытию новых, неизвестных ранее свойств небесных тел, в частности Солнца, новых и сверхновых звезд, межзвездной материи и связанных с нею магнитных полей, далеких галактик и квазаров.

Что же является источником космических лучей? Наблюдения показывали, что они приходят отовсюду, со всех сторон равномерно, не обнаруживая концентрации ни в сторону Солнца, ни к плоскости эклиптики, ни к галактическому экватору, ни к направлениям на ближайшие галактики. Это их свойство называется *изотропией* *).

И все же астрофизики попытались выяснить, не является ли, хотя бы частично, источником космических лучей Солнце. Первые указания на это были получены В. Гессом еще в 1936 г. Однако многолетние наблюдения показали, что на долю солнечной компоненты (в существовании которой никто не сомневался) приходится лишь небольшая доля (около 0,1%) космического излучения.

Выдвигались и другие гипотезы происхождения космических лучей. Ну, например, если Солнце испускает частицы высоких энергий, то испускают их, очевидно, и другие звезды. Не может ли быть источником космических лучей суммарное излучение всех звезд Галактики? Ответ был прост: нет, не может, потому что по энергии космическое излучение составляет ничтожную долю (10^{-10}) общей энергии Солнца и, стало быть, звездные космические лучи должны составить такую же долю от энергии излучения всех звезд. А на самом деле энергия приходящих на Землю первичных космических лучей сравнима с энергией света звезд. Общее выделение энергии космических лучей в нашей Галактике, по подсчетам В. Л. Гинзбурга, составляет 10^{39} — 10^{40} эрг/сек, Солнце же выделяет только 10^{22} — 10^{23} эрг/сек. Поэтому, если даже помножить эту величину на число звезд в Галактике (10^{11}), мы получим едва одну миллионную долю требуемой энергии.

Можно было бы предположить, что звезды являются только инжекторами космических лучей, т. е. «впрыскивают» их в межзвездное пространство, а дальнейший разгон им придают межзвездные магнитные поля. Таким путем можно повысить энергию в 100—1000 раз, не больше, но никак не в миллионы раз, как требует сравнение с энергией космических лучей Галактики.

Итальянский ученый Дж. Коккони защищал одно время гипотезу о межгалактическом происхождении космических лучей. Однако если эти лучи приходят к нам из межгалактических пространств, то возникает вопрос: где же они заро-

*) Слово «изотропный» означает «равномерный по всем направлениям».

ждаются? В других галактиках? Но тогда, во-первых, они должны зарождаться и в нашей Галактике (чем она хуже других?), а, во-вторых, магнитное поле нашей Галактики должно создавать для «чужих» космических лучей своеобразный барьер и влет к нам этих «чужеземцев» будет сильно ограничен: пробиться смогут только самые энергичные частицы с энергиями больше 10^{12} эв.

Допустим на минуту, что это так. Если среди частиц самых высоких энергий (10^{12} — 10^{19} эв) существует вклад межгалактических космических лучей, энергетический спектр их должен претерпевать излом где-то около энергии 10^{12} эв (к галактическим лучам здесь добавляется межгалактическая компонента). Но никакого излома нет, значит, ни в какой области энергий межгалактические лучи заметной роли не играют.

Остается сделать вывод, что космические лучи зарождаются в нашей Галактике. Но каким образом и где именно?

В 1949 г. этим вопросом заинтересовался известный итальянский физик Энрико Ферми. Он первый указал, что время жизни частиц космических лучей в Галактике ограничено их столкновениями с атомами межзвездного газа. Средняя продолжительность жизни одной частицы — порядка периода вращения Галактики вокруг оси (200 миллионов лет). Это значит, что примерно каждые 400 миллионов лет происходит полное обновление состава частиц первичных космических лучей в Галактике. Значит, в ней действует какой-то постоянный механизм, пополняющий их запасы.

Э. Ферми разработал теорию ускорения энергичных заряженных частиц межзвездными магнитными полями, объяснил даже их энергетический спектр, но откуда берутся эти самые частицы (в частности, протоны с энергиями свыше 10^8 эв), прежде чем они будут ускоряться, — на этот вопрос Ферми не дал ответа.

Другой механизм ускорения заряженных частиц, в так называемых «космических генераторах», детально развил в 1946—1951 гг. советский физик Я. П. Терлецкий. В качестве «космических генераторов» Я. П. Терлецкий рассматривал вращающиеся звезды с сильными магнитными полями или звезды с переменным магнитным моментом. Однако его теория не давала ответа ни на вопрос о происхождении заряженных частиц, ни на вопрос о мощности «космических генераторов». В его работах рассматривалась лишь чисто электродинамическая задача: производился расчет полей, траекторий заряженных частиц, их энергии.

Из астрономических данных использовались напряженности магнитных полей, скорости вращения и размеры небесных тел, а реальные физические условия в космических объектах не учитывались. Это было большим недостатком теории Терлецкого и других подобных теорий.

Мы уже говорили, что в 1951 г. советский физик, член-корреспондент АН СССР В. Л. Гинзбург и радиоастроном

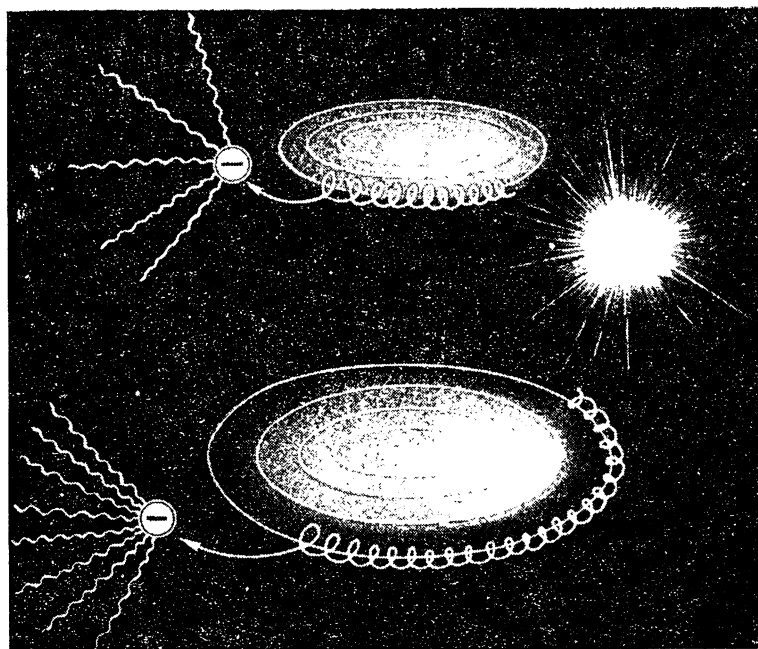


Рис. 32. Торможение релятивистских электронов в межзвездных магнитных полях.

Г. Г. Гетманцев, анализируя данные о радиоизлучении Галактики, пришли к выводу, что механизм, порождающий это радиоизлучение, — это торможение релятивистских электронов в межзвездных магнитных полях (рис. 32). Теория этого механизма была разработана В. Л. Гинзбургом, а ее сравнение с наблюдениями было выполнено Г. Г. Гетманцевым. Успех теории позволил не только объяснить радиоизлучение Галактики и отдельных радиоисточников,

таких, как Крабовидная туманность, но имел решающее значение в исследовании природы космических лучей.

До работ В. Л. Гинзбурга и астрофизика И. С. Шкловского (построившего, как мы уже знаем, теорию радиоизлучения и оптического излучения Крабовидной туманности на основе все того же механизма торможения релятивистских электронов в межзвездных магнитных полях) мы могли изучать космические лучи только непосредственно вблизи Земли. Теперь астрономы получили возможность путем анализа космического радиоизлучения исследовать по крайней мере электронную составляющую первичных космических лучей в нашей Галактике. Но можно было с полным правом считать, как справедливо отметил в 1953 г. И. С. Шкловский, что такие свойства первичных космических лучей, как их пространственное распределение, должны быть одинаковыми и для электронной, и для протонно-ядерной составляющей.

Итак, картина прояснилась. Источниками космических лучей в нашей Галактике являются сверхновые и, в меньшей степени, новые звезды. Торможение электронной компоненты в магнитных полях туманностей — остатков сверхновых порождает радиоизлучение этих туманностей. Часть релятивистских электронов «прорывается» сквозь магнитные заслоны туманностей и выходит на просторы Галактики. Там тоже есть магнитные поля, хотя и более слабые, чем в Крабовидной туманности, напряженностью в 10^{-5} — 10^{-6} эрстеда. Они заставляют релятивистские электроны описывать довольно запутанные орбиты в пределах Галактики, заметно концентрируясь к ее главной плоскости (в слое толщиной около 1000 световых лет). Эти электроны создают общий фон галактического радиоизлучения. Впрочем, не все радиоизлучение Галактики связано с этим механизмом. Другая его составляющая, имеющая еще более заметную концентрацию к галактической плоскости, представляет собой, как показал И. С. Шкловский, тепловое излучение межзвездного ионизованного газа.

Но радиоизлучение остатков сверхновых длится недолго — для сверхновых I типа не более 3000 лет. Постепенно радиотуманности рассеиваются в пространстве, слабеет и связанное с ними магнитное поле, и электроны вырываются на свободу, чтобы еще сотни миллионов лет гулять по космическим просторам.

Ну, а какова судьба протонов? Имея большую энергию из-за их большей массы, они успевают выйти за пределы

радиотуманности еще до того, как сформируется магнитное поле вокруг взорвавшейся звезды. Сталкиваясь с атомами межзвездного газа, они постепенно теряют энергию. Наоборот, встречая магнитные поля, движущиеся им навстречу, или неоднородности в магнитных полях, частицы разгоняются. Особенно больших энергий могут достичь частицы, случайно попавшие между двух «магнитных фронтов», движущихся навстречу друг другу. Поочередно отражаясь от обоих фронтов, частицы получают все новые и новые порции энергии. По расчетам В. Л. Гинзбурга, частица, имевшая не очень большую по космическим масштабам скорость 3000 км/сек , испытывав 50 столкновений с магнитными фронтами, удваивает свою энергию.

Сталкиваясь с ядрами межзвездных атомов, релятивистские протоны порождают другие, более легкие частицы: пи- и мю-мезоны, электроны и позитроны. Рождаются также вездесущие нейтрино.

Теория Гинзбурга—Шкловского выдержала испытание со всех точек зрения. Вот один из важнейших аспектов ее проверки — энергетический. Могут ли вспышки сверхновых обеспечить наблюдаемую энергию космических лучей: 10^{39} — 10^{40} эрг/сек ? Сделаем подсчет. При вспышке сверхновой энергия электронов, проявляющая себя через радиоизлучение, составляет 10^{47} — 10^{48} эрг , энергия же всех видов космических лучей еще в 100 раз больше. Вспышки сверхновых в Галактике происходят примерно раз в 30 лет, т. е. раз в 10^9 секунд. Поделив энергию космических лучей от одной вспышки (10^{49} — 10^{50} эрг) на интервал между вспышками, получим мощность выхода энергии $3 \cdot 10^{39}$ — $3 \cdot 10^{40} \text{ эрг/сек}$, т. е. как раз то, что нужно.

Еще неясен вопрос, могут ли давать существенный вклад в энергию космических лучей обычные новые. Хотя энергия их вспышек в 1000 раз меньше, чем у сверхновых, но зато они вспыхивают в 30 000 раз чаще, и поэтому они тоже могли бы служить инжекторами, поставщиками космических лучей, правда, вероятно, меньших энергий.

Теперь мы видим, как содружество физики и астрофизики позволило связать и объяснить с единой точки зрения столь, казалось бы, различные явления, как вспышки сверхновых (и вероятно новых), радиотуманности, радиоизлучение Галактики, межзвездные магнитные поля и космические лучи. Это — один из примеров диалектики познания, один из примеров мощи современной науки.

Почему же они взрываются?

Познакомившись с интересными и разнообразными явлениями, которые можно рассматривать как последствия вспышек сверхновых, вернемся к вопросу о причине этих вспышек. Ответить на этот вопрос, было невозможно только на наблюдения самих сверхновых, было невозможно. Исследования радиоизлучения туманностей — остатков сверхновых, а также установление их связи с происхождением космических лучей — все это дало новые факты, бесценные для теоретиков.

Теория должна была ответить на следующие семь вопросов, сформулированные И. С. Шкловским в его монографии «Сверхновые звезды», вышедшей в 1966 г.:

1. Почему наблюдаются два типа сверхновых? Механизмы взрыва у них должны быть различны. В чем состоит это различие?

2. Надо объяснить энергию взрыва сверхновых II типа, достигающую 10^{51} — 10^{52} эрг, с учетом того, что их массы составляют десятки солнечных масс, а удельная кинетическая энергия взрыва должна быть порядка 10^{17} эрг/г.

3. Для сверхновых I типа (с массой порядка солнечной) кинетическая энергия выброшенной оболочки — 10^{48} эрг, а масса — примерно $0,1 M_{\odot}$. Надо объяснить их энергетику.

4. Отношение энергии излучения к кинетической энергии сброса оболочки различно для обоих типов сверхновых: для I типа оно порядка 100, т. е. энергия излучения равна примерно 10^{50} эрг, тогда как для II типа при той же абсолютной величине энергия излучения составляет лишь $0,01$ — $0,1$ кинетической энергии. В чем причина такого различия?

5. Теория должна объяснить причину образования при взрывах всех сверхновых большого количества релятивистских частиц, суммарная энергия которых того же порядка, что и энергия магнитного поля: 10^{48} — 10^{49} эрг.

6. Необходимо объяснить происхождение самого магнитного поля, а также его структуру — в форме оболочек у сверхновых II типа и волокнистую у Крабовидной туманности.

7. Наконец, надо объяснить продолжающуюся активность бывшей сверхновой 1054 г. — ядра Крабовидной туманности. Хотя со времени вспышки прошла почти

тысяча лет, судя по радиоизлучению, ядро продолжает генерировать релятивистские частицы с мощностью 10^{37} эрг/сек.

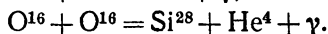
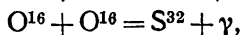
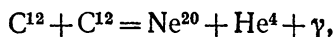
Первая наиболее разумная, по оценке И. С. Шкловского, попытка ответить на первые три вопроса из семи была сделана английскими астрофизиками Ф. Хойлом и У. Фаулером в 1960 г. Прежде всего нужно было найти источник той колоссальной энергии, которая выделяется при взрыве. Естественно было считать, что эта энергия имеет ядерное происхождение. Ее выделение носит катастрофический, взрывной характер и скорее всего происходит на заключительном этапе эволюции звезды.

Однако не всякое ядерное горючее может быть причиной взрыва. Например, протон-протонная реакция протекает очень медленно, несмотря на весьма высокую удельную энергию ($6 \cdot 10^{18}$ эрг/г), поэтому причиной взрыва быть никак не может.

Быстрее протекают реакции легких ядер с протонами, примером которых является уже известный нам углеродно-азотный цикл Бете (стр. 56). Длительность этого цикла при очень высоких температурах (порядка 100 миллионов градусов) определяется двумя реакциями бета-распада, которые занимают вместе 5 минут, давая выход энергии около 20 Мэв на ядро. У звезды типа Солнца каждый грамм вещества содержит $5 \cdot 10^{20}$ легких ядер, и, таким образом, удельный выход энергии при этом цикле составит около 10^{16} эрг/г, что на порядок меньше необходимого. Даже если бы звезда с массой Солнца целиком взорвалась от такой реакции, выделилось бы только 10^{49} эрг энергии, что тоже на порядок меньше, чем надо для взрыва сверхновой I типа, не говоря о сверхновых II типа. К тому же скорость разлета газов при таком взрыве не превысила бы 500 км/сек.

Значит, сверхновая звезда перед взрывом должна иметь иной химический состав, чем Солнце: обилие легких элементов по отношению к водороду у нее должно быть в десятки раз больше, чем у Солнца. К такому выводу и пришли Хойл и Фаулер в своем исследовании. Этот вывод вновь указывает на то, что взрыв сверхновой может произойти лишь на заключительном этапе эволюции звезды, когда выгорает не только водород, но и гелий — в ходе реакции Салпетера (см. стр. 78) — и образуется значительное количество ядер углерода и кислорода. А дальше, при достаточно высоких температурах (около 2 миллиардов градусов), могут протекать очень быстрые ядерные реакции с образова-

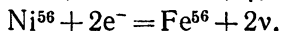
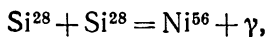
нием из ядер углерода и кислорода еще более тяжелых элементов:



Эти реакции не только протекают достаточно быстро (за время порядка одной секунды!), но и дают требуемый выход энергии — около $5 \cdot 10^{17}$ эрг/г. Взрыв массы такого вещества в $0,1 M_{\odot}$ даст энергию в 10^{50} эрг — почти то, что нужно для вспышки сверхновой I типа, а если взорвется масса в $10 M_{\odot}$, получится выход энергии 10^{52} эрг, как у сверхновых II типа.

Итак, необходимое ядерное горючее найдено. Но как взорвать его? Очевидно, что для этого необходимо быстрое, даже очень быстрое повышение температуры. Скорость ядерных реакций на легких элементах очень сильно зависит от температуры, поэтому даже небольшое увеличение температуры вызовет катастрофическое ускорение этих реакций.

Что же может послужить причиной столь быстрого роста температуры? Такой причиной может явиться, например, катастрофическое сжатие звезды. Допустим, что мы имеем дело с массивной звездой, от 10 до $30 M_{\odot}$ (именно такие звезды рассматривали Хойл и Фаулер). В конце своего жизненного пути такая звезда состоит из ядра с массой около 0,1 массы всей звезды, состоящего преимущественно из элементов группы железа, которые образуются в ходе реакций вида



Такие реакции возможны при температурах 3—4 миллиарда градусов, которые осуществляются в результате последовательного выгорания водорода, гелия и углеродно-кислородной группы в ядрах массивных звезд.

Исследование ядерных процессов, приводящих к образованию ядер группы железа или происходящих с их участием, было произведено Фаулером и Хойлом очень подробно и тщательно. Им удалось вывести теоретическое распределение относительных распространенностей элементов этой группы, а также различных изотопов железа, которое

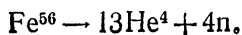
хорошо совпало с наблюдаемыми распределениями на Солнце и в метеоритах, дав тем самым подкрепление теории образования этих элементов. Мы видим теперь, что изучение сверхновых тесно связано еще с одной важнейшей проблемой современной физики — с проблемой происхождения химических элементов. Однако эта проблема столь сложна, что мы ее здесь специально рассматривать не будем.

Вернемся к процессам, приводящим к взрыву сверхновой. «Железное» ядро массивной звезды должно быть окружено углеродно-кислородной оболочкой, в которой царят температуры меньше 1,5 миллиарда градусов. При быстром сжатии ядра звезды в нем самом взрыв произойти не может, так как любое преобразование ядер группы железа — как в более тяжелые, так и в более легкие — сопровождается поглощением, а не выделением энергии. Взрыв может произойти только в оболочке, если она тоже испытает быстрое сжатие. Для этого нужно, чтобы при сжатии ядра оболочка «упала» бы на него (по законам свободного падения тел). Тогда примерно за одну-две секунды оболочка разогреется до двух-трех миллиардов градусов и взорвется, произведя вспышку сверхновой.

Остается выяснить, что же может заставить ядро звезды катастрофически сжаться за время порядка одной секунды. Правда, ядерных источников энергии в ядре звезды уже нет и гравитационные силы должны форсировать сжатие. Но ведь при сжатии будет повышаться температура ядра, а это замедлит процесс сжатия, оно не будет катастрофическим. Значит, нужно найти какой-то «холодильник», который бы в буквальном смысле «принимал огонь на себя», препятствуя разогреванию ядра.

Что могло играть роль «холодильника»? Хойл и Фаулер перебрали несколько механизмов. Часть энергии должны были уносить нейтрино. Но сколько? Подсчет показал: 10^{13} эрг/г·сек. А нужно в 100 000 раз больше. Потери за счет излучения были еще слабее. Значит, эти два механизма не годились на роль «холодильника», хотя, как выяснилось потом, они как бы «конвоировали» к нему звезду.

И все-таки Хойл и Фаулер нашли процесс, играющий роль «холодильника». Исследования показали, что при дальнейшем повышении температуры в недрах звезды (выше 4—6 миллиардов градусов) ядра атомов железа будут превращаться в смесь нейтронов и альфа-частиц (ядер атомов гелия):



Такая реакция требует, однако, затраты энергии, и притом немалой: $2,2 \text{ Мэв}$ на нуклон, или $2 \cdot 10^{18} \text{ эрг/г}$. Она намного превышает запас тепловой энергии в звезде на единицу массы, и, чтобы «диссоциировать» ядра атомов железа на альфа-частицы и нейтроны, нужен иной источник энергии. Это может быть только гравитационная энергия.

Таким образом, «холодильник» был найден. Оставалось проследить весь процесс от начала до конца. Хойл и Фаулер построили диаграмму состояния звезды (рис. 33), отложив по вертикальной оси логарифм плотности, а по горизонтальной — температуру. Кривая *I* на этой диаграмме отделяет области с равновесным состоянием «железного» ядра (слева от кривой) от области, где господствует смесь альфа-частиц и нейтронов (справа). Ядро звезды за счет «медленных» энергетических потерь — нейтринного и фотонного излучения — изменяет свое состояние вдоль кривой *II* или *III*: его плотность и температура медленно растут. Так продолжается около года, пока путь звезды на диаграмме не упрется в кривую *I*. Пересечь ее звезда не может: не хватает энергии, чтобы преодолеть энергетический барьер в $2,2 \text{ Мэв}$ на нуклон. И звезда начинает изменять свое состояние вдоль кривой *I*, т. е. увеличивать плотность гораздо быстрее, чем ей «положено» (в случае равновесного изменения состояния), при сравнительно медленном увеличении температуры. Заметьте, что кривая *I* на диаграмме идет гораздо круче кривых *II* и *III* и что вертикальный масштаб — логарифмический. Быстрый рост плотности приведет к тому, что гравитационная энергия станет гораздо больше тепловой, механическое равновесие звезды будет нарушено, и ядро испытает катастрофическое сжатие (коллапс). Выделяющаяся при этом энергия пойдет не на нагревание ядра, а поглотится «холодильником» — реакцией распада ядер железа на смесь альфа-частиц и нейтронов. Альфа-частицы в этих условиях тоже не останутся стабильными, а под действием излучения (гамма-лучей!) расщепятся на два протона и два нейтрона, забрав еще весьма солидную порцию энергии (втрое больше, чем распад ядер железа).

Сжатие «железного» ядра звезды произойдет столь быстро (примерно за секунду), что оболочка просто не успеет перестроиться. Но в следующий же миг она начнет падать на ядро. Как только ее температура в ходе сжатия превысит 2 миллиарда градусов, в ней начнется бурное выгора-

ние кислорода и углерода (помните, читатель, что здесь речь идет не о горении в обычном смысле слова, которое

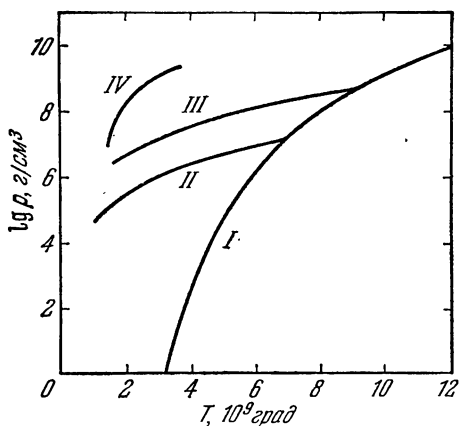
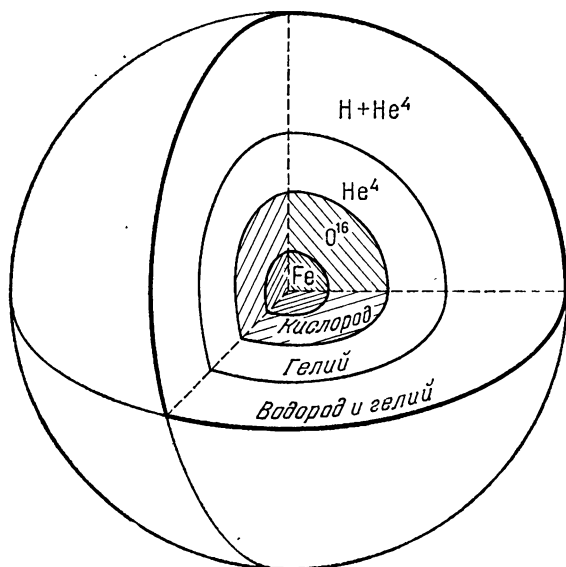


Рис. 33. Схема строения и диаграмма состояния звезды перед вспышкой сверхновой (по Хойлу и Фаулеру).

мы так привыкли связывать с кислородом, а о ядерных превращениях). Произойдет взрыв оболочки, который мы и будем наблюдать как вспышку сверхновой.

Такова была в общих чертах теория Хойла и Фаулера. В период 1960—1965 гг. она подверглась существенной доработке и уточнению, в которых, кроме авторов теории, приняло участие много других ученых.

Американский физик, китаец по национальности, Чиу (Цзю Хун-е) изучил более подробно вопрос о роли нейтринного излучения в энергетическом балансе сверхновой. При температурах около миллиарда градусов одним из главных процессов, ведущих к появлению нейтрино, является аннигиляция электронов с позитронами. В ходе такой реакции рождаются пары нейтрино—антинейтрино. При еще больших температурах эти пары могут рождаться непосредственно из фотонов излучения. Но главную роль в уносе энергии посредством испускания нейтрино играет у р к а - п р о ц е с с.

Этот термин взят отнюдь не из воровского жаргона. Происхождение его куда более романтическое. Однажды, в 1941 г., уже известный нам Г. Гамов и астрофизик М. Шенберг очутились в Рио-де-Жанейро и зашли в казино. Коллеги решили попытаться счастья, выложили деньги. Вместо денег они получили специальные жетоны, которые и поставили на игру. Увы, им не повезло, они проиграли. Решив больше не рисковать, они отошли к соседнему столу, который был свободен от игры. Шенберг задумчиво стал чертить мелком на зеленом сукне схему: деньги превращаются в новую форму (жетоны), которая с небывалой легкостью ускользает от их владельцев.

— Позвольте! Но это же идея! Энергия, прежде чем покинуть звезду, может превратиться в другую форму, которая легче ускользает, — в нейтрино! — воскликнул Гамов.

Оба ученых тут же, забыв обо всем на свете, мелом на сукне набросали основы теории процесса, в котором сначала ядро захватывает электрон и испускает нейтрино, после чего образовавшееся нестабильное ядро испытывает бета-распад, т. е. выделяет захваченный электрон и вдобавок антинейтрино. Так кинетическая энергия электрона превращается в нейтринно-антинейтринную пару, которая покидает звезду, унося энергию.

Когда Гамов и Шенберг задумались, как назвать новый процесс, они решили назвать его по имени Казино де Урка, где так неожиданно родилась теория этого процесса. И вот спустя 20 лет эта теория нашла себе применение в проблеме взрыва сверхновых. Последовательно разрабатывая теорию

нейтринного излучения при температурах от одного до шести миллиардов градусов и плотностях от 10^6 до 10^{15} г/см³, Чиу пришел к выводу, что при некоторых условиях отток энергии за счет нейтрино сам по себе будет достаточным, чтобы служить «холодильником» и обеспечить коллапс звезды. Таким образом, превращение железа в гелий и нейтроны может и не наступить. Впрочем, в дальнейшем Чиу рассмотрел возможность параллельного протекания обоих процессов. Условием начала коллапса является достижение в ядре плотности 10^9 г/см³ и температуры 3 миллиарда градусов.

В 1966 г. С. Колгейт и Р. Уайт впервые провели серию расчетов, показывавших динамику взрыва, для звезд разных масс: от 1,5 до $10 M_{\odot}$. Они получили два новых важных вывода. Во-первых, сжатие ядра сверхновой прекращается при достижении плотности 10^{15} г/см³. Во-вторых, и это — самое главное, при столь высоких плотностях вещество звезды становится непрозрачным даже для нейтрино. Кроме того, при падении промежуточных слоев (кислородной мантии) на ядро в них образуется мощная ударная волна, которая для кислорода служит как бы о л н о й д е т о н а ц и е й. Образовавшиеся при этом нейтрино переносят энергию во внешние слои звезды, перекачивая, таким образом, энергию сжимающихся внешних слоев в энергию разлетающейся оболочки.

Английский астрофизик Д. Арнетт, сотрудник известного теоретика А. Камерона, уточнил теорию Колгейта и Уайта, указав на необходимость учитывать не только электронные, но и мюонные нейтрино, которые выносят почти на два порядка больше энергии. Им тоже была выполнена большая серия расчетов взрыва сверхновых.

Итак, выделение энергии в кислородной оболочке связано с прохождением через нее мощной сферической волны детонации. Решение задачи о распространении такой волны в звезде с убывающей наружу плотностью было дано еще в 1956 г. советскими газодинамиками Л. И. Седовым и И. М. Яворской. Правда, оно содержало ряд упрощающих предположений, но зато давало полную картину процесса.

Расчет динамики взрыва массивных звезд, $(10 \div 30) M_{\odot}$, был сделан в 1964—1967 гг. советскими астрофизиками В. С. Имшенником, Д. К. Надёжиным и Л. Н. Ивановой. У них получилась следующая картина. Начинается коллапс ядра — растет непрозрачность его для нейтрино. Когда потери энергии ядром за счет нейтринного излуче-

ния прекращаются, коллапс останавливается, и от ядра к периферии пойдет ударная волна, вызывающая детонацию кислорода в мантии и сброс оболочки. Полная энергия нейтринного излучения достигает $8 \cdot 10^{51}$ эрг, энергия детонации $3 \cdot 10^{51}$ эрг, но только 10% этой величины переходит в кинетическую энергию оболочки. Сбрасывается лишь $0,25 M_{\odot}$, чего явно недостаточно для картины взрыва сверхновой II типа (а у сверхновых I типа массы гораздо меньше). Однако в этом расчете не были учтены некоторые важные эффекты, связанные с перераспределением энергии нейтрино, и результаты еще нельзя считать окончательными.

Советские астрофизики В. С. Имшенник, Д. К. Надёжин, Э. К. Грасберг, Д. А. Франк-Каменецкий и другие развили теорию, объясняющую вид кривых блеска сверхновых. Они рассмотрели выход ударной волны на поверхность звезды, сброс оболочки, ее расширение и охлаждение за счет сперва расширения, а потом излучения. Им удалось объяснить основные черты кривых блеска сверхновых II типа и получить правильную скорость разлета оболочки (5000 км/сек).

Так трудами многих ученых был найден, наконец, механизм, объясняющий вспышки сверхновых II типа. Последующие уточнения деталей этого механизма неизбежны, подобно тому как по мере совершенствования конструкции автомобиля или самолета приходится заменять иногда целые узлы. Но это не меняет принципа их движения.

Немалая работа была проведена и по теории вспышек сверхновых I типа, которые происходят, по единодушному мнению астрофизиков, при коллапсе белых карликов, таким образом заканчивающих этот период своего существования.

Наконец, в самые последние годы теория взрыва сверхновых обогатилась учетом магнитогидродинамических факторов. Ядро звезды должно обладать довольно сильным магнитным полем. Поскольку звезда вращается, при сжатии ядра она будет вращаться еще быстрее. Но, как показал еще в 1964 г. молодой московский астрофизик Н. С. Кардашев, магнитное поле звезды при этом закручивается (силовые линии как бы наматываются на ядро) и от этого еще больше усиливается. Оно и является причиной образования магнитного поля, окружающего остаток сверхновой, и его последующей активности, о которой мы писали выше. Н. С. Кардашев объяснил, исходя из этой модели, и характеристики радиоизлучения остатков сверхновых I и II типа,

и даже причину различия между ними. Дело в том, что у звезд большой массы закручивание магнитного поля прекращается на более раннем этапе из-за того, что магнитная связь между ядром звезды и оболочкой обрывается. У оболочки образуется свое собственное магнитное поле, поэтому поле сверхновых II типа и имеет «оболочечную» структуру.

Идея Кардашева получила дальнейшее развитие. Чиу и его сотрудники рассчитали, что звезда, равная по массе Солнцу, испытав коллапс, может усилить свое магнитное поле в 10 миллиардов раз! А другой московский астрофизик, Г. С. Бисноватый-Коган, попытался даже объяснить взрыв самих сверхновых передачей момента вращения сильным магнитным полем от ядра звезды к оболочке. Получается, что, как только сжатие ядра (коллапс) остановится и ядро превратится в быстро вращающуюся нейтронную звезду, происходит интенсивная намотка силовых линий на звезду, как ниток на катушку. Бисноватый-Коган полагал, что раскрученная магнитным полем оболочка разлетится под действием одной центробежной силы. Азербайджанские астрофизики, сотрудники Шемахинской обсерватории П. Р. Амнуэль, О. Х. Гусейнов и Ф. К. Касумов показали, что этот вывод ошибочен: центробежные силы велики лишь в самом начале, когда оболочка только образовалась и находится рядом со звездой. Зато потом намотка силовых линий увеличивает магнитное давление настолько, что оно становится больше центробежных и гравитационных сил. Оболочка вылетает, как из пушки. Расширившись до радиуса Солнца, она уже летит со скоростью до 3—5 тысяч километров в секунду — и это только за счет магнитного давления.

Расчет шемахинских астрофизиков показал, что масса оболочки, образовавшейся таким путем, не превышает $0,1 M_{\odot}$, и, значит, этот механизм годен для объяснения взрывов сверхновых I типа.

Но здесь нам придется пока поставить точку, хотя наука ее еще не поставила. А ведь мы довели наш рассказ о сверхновых до 1971 г. Мы убедились, что изучение этих замечательных объектов подтолкнуло развитие и таких разделов науки, как нейтринная астрофизика и магнитогидродинамика. Но и наблюдательная астрономия не стояла на месте. Она обогатила нас в 1968 г. открытием пульсаров — быстро вращающихся нейтронных звезд, которые тоже тесно связаны со сверхновыми. Вот какие это замечательные звезды!

Г л а в а III

ГИПОТЕЗЫ О РОЖДЕНИИ ЗВЕЗД

Как рождаются звезды?

Мы проследили все этапы звездной эволюции: от формирования звезды как таковой и вступления ее на главную последовательность до различных вариантов ее возможного конца. Но мы намеренно не касались самого начала жизни звезд — их происхождения. Эта задача — самая трудная и до сих пор не имеет однозначного решения.

Задачу о происхождении звезд можно разбить на две части. Первая: из чего образуются звезды? И вторая: как это происходит?

Как это ни странно, но первая попытка дать ответ на вопрос «из чего?» была сделана еще до изобретения телескопа, 400 лет тому назад! Сделал ее Тихо Браге после наблюдения вспышки своей сверхновой. Он считал, что появление новой звезды связано с внезапным сгущением туманообразной материи, рассеянной по всему Млечному Пути. Тихо казалось даже, что вокруг звезды образовалась некоторая «пустота» после того, как «туманный» материал был «вычерпан» звездой. Напомним, что Сверхновая 1572 г. вспыхнула в созвездии Кассиопеи, через которое проходит Млечный Путь, так что «пустота», по мнению Тихо, образовалась именно в Млечном Пути. Разумеется, никакой пустоты в действительности не образовалось, а впечатление Тихо связано с явлением контраста и даже, возможно, с подсознательным стремлением подкрепить чем-то свою идею. Взгляды Тихо разделял и Кеплер в своих рассуждениях о причинах вспышки Сверхновой 1604 г.

Прошло 200 лет, и трудами Вильяма Гершеля были заложены основы звездной астрономии. В распоряжении астрономов уже были многочисленные данные о звездах и туманностях, но представления о зарождении звезд остались прежними. Гершель считал, что «самосветящаяся материя, кажется, скорее способна, сгущаясь, образовать звезду,

нежели быть обязанной звезде своим происхождением». Эти идеи Гершель развивал начиная с 1791 г., но особенно подробно изложил их в двух трактатах, опубликованных в 1811 и 1814 гг.

Аналогичные взгляды высказывали и другие ученые. Иммануил Кант еще в 1755 г. в своей знаменитой гипотезе о происхождении Солнечной системы утверждал, что она (в том числе и Солнце — одна из звезд) произошла из холодной пылевой туманности. Пьер Симон Лаплас почти одновременно с Гершелем (в 1796 г.) высказал идею о происхождении Солнца из газовой туманности за счет ее сжатия в ходе вращения — тут уже фигурировал некий мезанзим, пытавшийся дать ответ и на вопрос «как?»*).

Прошло еще сто лет. За это время были измерены расстояния до звезд, с помощью спектрального анализа были установлены их температуры и физическое состояние, многое узнали астрономы и о природе газовых и пылевых туманностей. Высказывались и различные варианты гипотезы происхождения звезд из диффузной материи. Английский астроном Норман Локиер, например, выдвинул в 1887 г. гипотезу о происхождении звезд из метеорной пыли, о чем мы уже упоминали в главе I (стр. 37). Но большинство астрономов конца XIX в. разделяло идеи Гершеля о том, что звезды образуются путем сгущения вещества газовых туманностей.

Существенный сдвиг в этом вопросе произошел лишь в 1916—1919 гг., когда Джеймс Джинс опубликовал свои известные работы, в которых рассматривал такие, казалось бы, разные вопросы, как эволюция галактик, происхождение звезд (в том числе двойных) и, наконец, происхождение Солнечной системы.

Джинс рассматривал сферические и эллиптические галактики как последовательные стадии развития галактик вообще. По его мнению, вначале будущая галактика имеет почти сферическую форму и представляет собой настоящую газовую туманность. Лишь потом, по мере сжатия и уплотнения туманности, происходит разделение ее на отдельные сгустки, туманность приобретает спиральную форму, плотность вещества в витках спирали увеличивается, облегчая формирование звезд.

*) Об истории создания и развития гипотез Канта и Лапласа см. В. А. Бронштэн, Беседы о космосе и гипотезах, «Наука», 1968.

Спустя 10 лет Эдвин Хаббл разрешил внешние части многих галактик на звезды, а в дальнейшем было окончательно доказано, что все галактики состоят в основном из звезд. Это выбило почву из-под гипотезы Джинса об эволюции галактик. Но его соображения об условиях формирования звезд из газовой материи отнюдь не потеряли своего значения.

Джинс много занимался газовой динамикой, и это помогло ему сформулировать условия, необходимые для того, чтобы масса разреженного газа сгустилась в звезду. Это условие получило название принципа гравитационной неустойчивости.

Допустим, что мы имеем массу газа, холодного в том смысле, что его излучение не играет никакой роли, но имеющего некоторую температуру T , определяемую кинетической энергией его молекул и атомов. Чтобы сгущение, образовавшееся в такой туманности, не рассеивалось, а начало сжиматься под действием сил взаимного притяжения его частиц, необходимо, чтобы кинетическая энергия единицы массы сгущения оставалась меньше ее потенциальной энергии, взятой с обратным знаком.

Кинетическая энергия единицы массы газа с плотностью ρ , давлением p и массой одного атома (или молекулы) m равна

$$L = \frac{3}{2} \frac{p}{\rho} = \frac{3}{2} \frac{k}{m} T,$$

где k — постоянная Больцмана. С другой стороны, потенциальная энергия той же массы газа, определяемая притяжением всего сгущения, равна

$$U = -\frac{3}{5} \frac{fM}{R},$$

где f — постоянная тяготения, M , R — масса и радиус сгущения. Чтобы удовлетворялось условие $L < -U$, нужно, чтобы масса сгущения была значительно больше некоторой критической величины, а именно:

$$M \gg \frac{5}{4\sqrt{3\pi}} \frac{\bar{v}^3}{f^{3/2} \rho^{1/2}},$$

где \bar{v} — средняя скорость частиц ($\bar{v}^2 = \frac{3kT}{m}$). Отсюда следует еще одно условие (оно получится, если подставить значения всех постоянных):

$$\frac{\rho R^2}{T} \gg 3 \cdot 10^{14}.$$

Джинс принимал средние плотности туманностей в эпоху формирования звезд 10^{-21} — 10^{-23} г/см³ (от 6 до 600 атомов водорода в одном кубическом сантиметре), а температуры — крайне низкие (от 0,3 до 8 градусов от абсолютного нуля). Для самой низкой температуры (0,3 °К) массы устойчивых сгущений получились у него порядка звездных масс: $(1,7 \div 17)M_{\odot}$, для более высоких температур — гораздо больше: десятки, сотни и даже тысячи солнечных масс.

Согласно Джинсу, первоначальная плотность туманности составляла примерно 10^{-30} г/см³, а образование сгустков начинало происходить при плотностях, указанных выше. Джинс не мог объяснить, почему оно не могло начаться при промежуточных плотностях, например при 10^{-27} г/см³. Правда, в этом случае массы сгустков были бы в сотни тысяч раз больше звездных, но никаких ограничений на этот счет теория Джинса не содержала. Просто ему нужно было получить массы порядка звездных, и он про о з в о л ь н о отнес процесс их формирования к той эпохе, когда плотность туманности достигла 10^{-23} г/см³.

Теория формирования звезд из газа за счет гравитационной неустойчивости, разработанная Джинсом, в течение более чем 30 лет молчаливо принималась большинством астрономов, вошла во все учебники астрономии двадцатых—сороковых годов. Она сохраняла свои позиции в науке даже тогда, когда потерпели полное фиаско ее современницы: гипотеза происхождения и эволюции галактик и гипотеза происхождения Солнечной системы, тоже развитые Джинсом. И вдруг появилась совсем иная постановка вопроса...

Звезды из туманностей или туманности из звезд?

В 1931 г. в английском журнале «Observatory» была опубликована статья малоизвестного в то время астронома, сотрудника Московской обсерватории Б. А. Воронцова-Вельяминова под названием «Возможное происхождение диффузных туманностей и межзвездной материи». В этой небольшой статье (5 страниц) ее автор развивал совсем иные взгляды на связь эволюции звезд и газовых туманностей.

До 1931 г. диффузные туманности считались, в соответствии со взглядами Джинса, остаточным материалом, своего рода строительным мусором после образования звезд в нашей Галактике. Б. А. Воронцов-Вельяминов утверждал

обратное: материя, составляющая наблюдаемые нами туманности, выбрасывается некоторыми типами звезд. Таким образом, вещество этих звезд переходит в форму диффузной материи как в виде туманностей, так и в виде общего «фона» межзвездного газа.

Что же это за звезды, вещество которых пополняет межзвездную среду? Вообще говоря, можно считать, что в этом процессе участвует каждая звезда. Мы уже говорили выше (стр. 64), что Солнце ежегодно выбрасывает за счет корпускулярного излучения $7 \cdot 10^{17}$ г вещества. Значит, за миллиард лет одна средняя звезда типа Солнца выбрасывает около 10^{27} г, а 10^{11} звезд Галактики дадут 10^{38} г, т. е. около $10^5 M_{\odot}$.

Но есть звезды, выбрасывающие вещество во много раз интенсивнее. К ним относятся, прежде всего, новые и сверхновые, которые, как мы знаем, сбрасывают с себя при взрывах целые оболочки и действительно образуют непосредственно наблюдаемые туманности. По оценкам Воронцова-Вельяминова, за тот же срок (миллиард лет) новые поставляют в Галактику $2 \cdot 10^6 M_{\odot}$, а сверхновые — $3 \cdot 10^6 M_{\odot}$ диффузного вещества, т. е. в десятки раз больше, чем «обычные» звезды.

Однако и эти взрывающиеся звезды — не самый интенсивный источник пополнения запасов межзвездной материи. Почти в 20 раз больше, до $10^8 M_{\odot}$ диффузного вещества за миллиард лет, выбрасывают в межзвездное пространство звезды Вольфа—Райе.

Мы уже упоминали, хотя и очень коротко, об этих замечательных звездах на стр. 64. Напомним, что это — звезды, интенсивно испускающие материю, выбрасывающие около $10^{-5} M_{\odot}$ в год. Звезды Вольфа—Райе — яркие бело-голубые гиганты, в тысячи раз превышающие по светимости Солнце. Срок их существования, по-видимому, невелик — не более 10^6 лет, количество их в Галактике — около 10 000. По образному выражению Б. А. Воронцова-Вельяминова, это звезды, которые сами себя разрушают.

Из оценок количества звезд Вольфа—Райе в Галактике, срока их существования, их общей массы и скорости разрушения и была получена оценка поставляемой ими массы.

Наконец, не подлежит никакому сомнению, что планетарные туманности (рис. 34), окружающие очень горячие звезды (ядра планетарных туманностей), тоже обязаны своим происхождением центральным звездам, а не наоборот.

Но достаточно ли всех перечисленных выше источников для объяснения происхождения диффузных туманностей в нашей Галактике? По подсчетам самого Воронцова-Вельяминова, общая масса диффузной материи в Галактике заключена в пределах от 10^9 до $10^{10} M_{\odot}$. Учитывая, что Галактика существует не менее 10^{10} лет, можно предположить,



Рис. 34. Планетарная туманность в Лире.

что звезды Вольфа — Райе способны поставить за этот срок $10^9 M_{\odot}$ диффузного вещества. Принимая во внимание неизбежную неточность подсчетов и вероятный недоучет некоторых факторов, этот результат можно было признать вполне удовлетворительным.

Так что же из чего возникает: звезды из туманностей или туманности из звезд? А может быть, идут, взаимно компенсируя друг друга, оба процесса?

Тут нужно сразу же заметить, что, с точки зрения наблюдателей, эти два процесса находятся в неравноправном положении: в то время как превращение вещества звезд в вещество туманностей и межзвездного газа подтверждается целым рядом реально наблюдаемых фактов (корпускулярное излучение Солнца, сброс оболочек новых и сверхновых, истечение вещества из звезд Вольфа — Райе и др.), никто никогда не наблюдал, по крайней мере до 1950 г., каких-либо явлений, указывавших на возможность обратного перехода.

Это обстоятельство заставило одних астрономов искать на небе такие явления, и оно же заставило других астрономов отбросить вовсе идею возникновения звезд из диффузной материи и искать другие пути.

По первому пути пошел академик В. Г. Фесенков.

По второму пути пошел член-корреспондент АН СССР В. А. Амбарцумян.

И оба пути оказались весьма плодотворными.

Звездные цепочки и глобулы

Осенью 1950 г. на обсерватории Института астрофизики Академии наук Казахской ССР, расположенной на Каменском плато вблизи Алма-Аты, был установлен новый телескоп. Он не отличался большими размерами, как его американские собратья, но обладал весьма высокой светосилой (относительное отверстие 1 : 2,4) и отличным качеством изображений. Это был менисковый телескоп системы Д. Д. Максудова с главным зеркалом диаметром 67 см и 50-сантиметровым мениском. По программе, составленной академиком В. Г. Фесенковым, сотрудник обсерватории Д. А. Рожковский начал фотографировать на нем области неба, богатые газово-пылевыми туманностями.

К маю 1952 г. было накоплено около 400 негативов. Изображения звезд на этих негативах были почти точечные: слабые звезды давали изображения лишь в 20 микрон. Поле каждого снимка охватывало площадь в 30 квадратных градусов.

Просматривая снимки, В. Г. Фесенков и Д. А. Рожковский обратили внимание на тонкие светлые штрихи, соединяющие между собой некоторые звезды. Сперва Фесенков подумал, что это какой-то фотографический эффект, что-то вроде ореола, но сравнение различных снимков убедило его в том, что это реальное явление. Тончайшие волокна

соединяли между собой звезды в окрестностях, а иногда и внутри газовой-пылевой туманности.

Астрономы попробовали снимать сквозь узкополосный светофильтр, пропускающий излучение атомарного водорода в линии H_{α} , — волокна стали видны гораздо четче.

Но это было еще не все. Кроме волокон на снимках были явно видны цепочки звезд, иногда соединенных светлыми штрихами, а иногда и нет. Выступая на Втором совещании по вопросам космогонии в мае 1952 г., В. Г. Фесенков обратил внимание на эти объекты и указал, что звездные цепочки — образования неустойчивые, они не могли существовать долго, а значит, образовались недавно. Не означает ли все это, что «найден прямое указание на процесс образования звезд, происходящий и в настоящее время, который заключается не в том, что отдельные звезды часто располагаются на газовых волокнах, а в том, что сами волокна в некоторых случаях распадаются на звезды...»?

Впрочем, звездные цепочки были не единственным явлением, которое давало основание для такого истолкования. За пять лет до работы Фесенкова и Рожковского, в 1947 г., американские ученые Барт Бок и Э. Рейли обнаружили на фоне светлых газовых туманностей темные округлые объекты, которые они назвали г л о б у л а м и. Мнение, что глобулы это и есть как раз недостающее звено в процессе формирования звезд из диффузной материи, разделяли известные американские астрофизики Л. Спитцер и Ф. Уиппл. Массы глобул были порядка солнечной массы.

Дальше выяснилось, что глобулы связаны с темными «слоновыми хоботами» — длинными и узкими полосами темной материи, наблюдающимися на фоне светлых туманностей (рис. 35). Похоже было на то, что эти «хоботы» распадаются затем на глобулы, а последние дают начало звездам. Но температура глобул не превосходит 50°K , и нет объектов, которые можно было принять за переходную стадию от глобул к звездам. В. Г. Фесенков и Д. А. Рожковский, изучив все материалы, имевшиеся о глобулах, пришли к выводу о том, что они связаны с темным веществом, находящимся в газовых туманностях. Размеры глобул составляли 10—20 тысяч а. е. (0,15—0,3 светового года). Л. Спитцер показал еще в 1946 г. (т. е. до открытия самих глобул), что облако подобных размеров, на 90% состоящее из пыли, может оказаться гравитационно неустойчивым и начать сжиматься. Сжатие произойдет согласно теории Гельмгольца — Кельвина, температура глобулы будет повышаться,

и она может превратиться в звезду. Но на такую эволюцию должно уйти около 10 миллионов лет, а тогда мы бы непременно наблюдали все промежуточные стадии этого процесса.

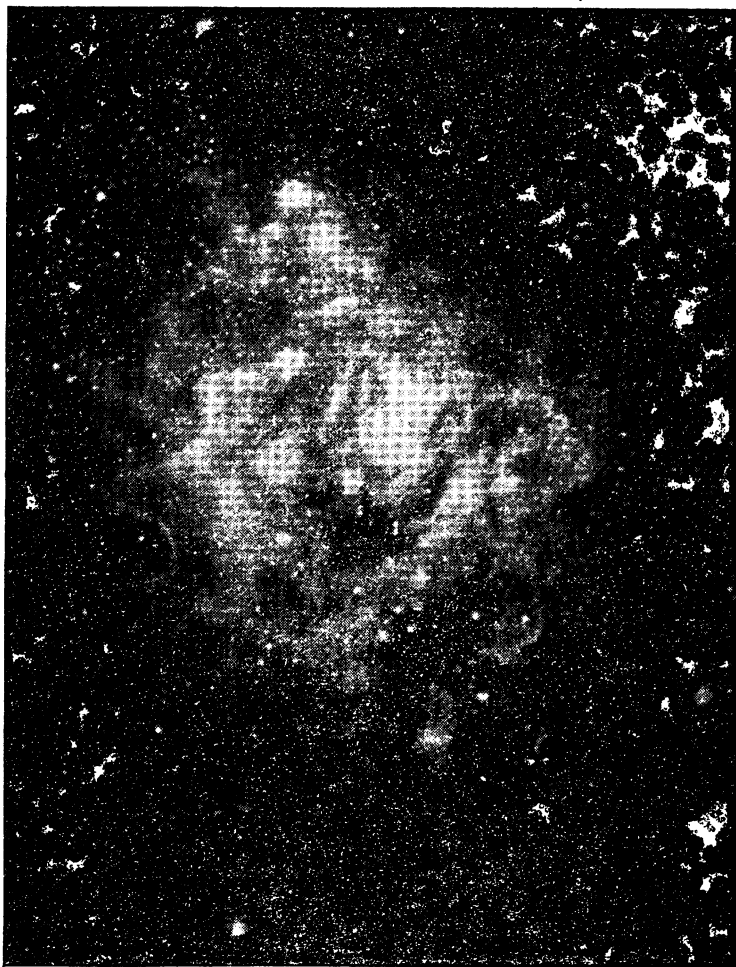


Рис. 35. Глобулы (темные круглые пятнышки) и «слоновые хоботы».

Проблема образования звезд из глобул еще долго служила предметом обсуждения среди астрономов — до середины 60-х годов. Обсуждались самые различные

механизмы их быстрого сжатия, например давление излучения окружающих звезд и горячих масс газа, прохождение ионизационных фронтов и другие. Окончательного решения эта проблема так и не получила.

А между тем наблюдения принесли новое открытие. Это произошло почти одновременно с открытием звездных цепочек. Американский астроном Дж. Хербиг и мексиканский астроном Г. Аро обнаружили небольшие туманности, содержавшие в себе иногда по несколько звездоподобных сгущений. И что было самое удивительное и неожиданное —

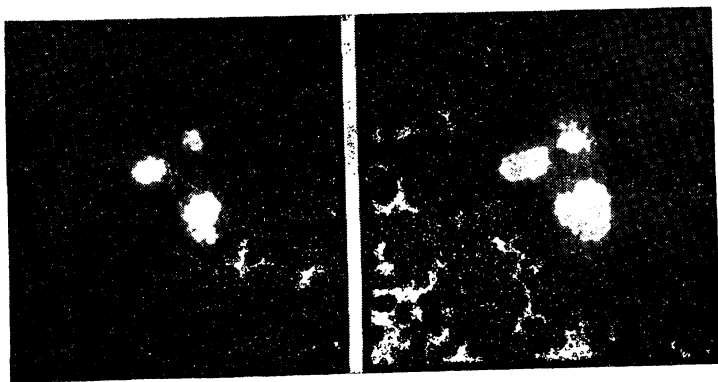


Рис. 36. Объекты Хербига — Аро: левый снимок сделан в 1947 г., правый — в 1954 г., заметно увеличение числа объектов.

эти сгущения росли буквально на глазах. Когда Хербиг и Аро сравнили фотографию одного из таких объектов в созвездии Ориона, полученную 20 декабря 1954 г., со снимком той же области, сделанным 20 января 1947 г. — на 8 лет раньше, — они были поражены: на снимке 1954 г. были ясно заметны два сгущения, которые на снимке 1947 г. отсутствовали (рис. 36).

В отличие от глобул, объекты Хербига — Аро были светлыми, их спектр не отличался от спектра кометообразных туманностей, окружающих молодые звезды типа Т Тельца. Но об этих звездах и их космогоническом значении мы расскажем чуть позже. И тогда же мы вновь вернемся к объектам Хербига — Аро. А сейчас вспомним о тех образованиях, с описания которых мы начали этот раздел, — о звездных цепочках.

Открытие В. Г. Фесенкова и Д. А. Рожковского наделало немало шума. Ученые бросились проверять, а не является ли собирание звезд в цепочку просто случайным совпадением. Ведь звезд в Млечном Пути очень много, а случайные комбинации их могут кое-где принять форму цепочек. Интересные эксперименты для проверки этого предположения организовал в 1957 г. немецкий ученый И. Мейрерс. Специальным аппаратом на плоскую пластинку распылялись небольшие (в доли миллиметра) стеклянные частицы, которые располагались на пластинке, разумеется, совершенно случайным образом. Затем пластинка фотографировалась, и получалась «звездная фотография», которая подвергалась дальнейшему изучению. И что же — на таких фотографиях были обнаружены тысячи цепочек, среди которых попадались даже состоявшие из восьми одинаковых «звезд». Мейрерс и его коллеги усложнили условия опытов. Они накладывали друг на друга фотографии с частицами двух, четырех и шести разных цветов (символизировавших спектральные классы звезд). И даже на четырех-шестицветных фотографиях встречались цепочки с шестью-семью «звездами» одинакового цвета.

Польский ученый С. Зубжицкий подошел к этому вопросу с другой стороны. Он изучал не искусственные, а подлинные фотографии неба с цепочками и подверг их тщательному статистическому анализу. Основной вывод, полученный Зубжицким, состоял в том, что в изученных им двух областях неба не наблюдается тенденция звезд собираться в цепочки.

Гораздо более глубокий анализ реальности цепочек выполнил в 1954 г. профессор Д. Я. Мартынов по снимкам, полученным с помощью светосильного телескопа Шмидта Астрономической обсерватории им. Энгельгардта (близ Казани). Для звезд цепочек (которых было найдено десять) были сравнены их звездные величины и цвета. Зависимость «звездная величина — цвет» приблизительно отражает зависимость «спектр — светимость», если звезды цепочки одинаково удалены от нас. Для половины цепочек эта зависимость оказалась такой же, как у звезд главной последовательности, для других зависимости не получилось. Но Д. Я. Мартынов обнаружил две цепочки из 15 звезд каждая. Можно было подсчитать, что вероятность случайного объединения 15 звезд в цепочку меньше одной миллионной. Мартынов описал целый ряд свойств наблюдавшихся им цепочек и подтвердил их реальность.

Продолжали исследования звездных цепочек и В. Г. Фесенков с Д. А. Рожковским. Теперь уже все замеченные цепочки проверялись по признаку физического сходства. Интересное исследование цепочек выполнил и московский астроном Э. А. Дибай по фотографиям, полученным им на Абастуманской обсерватории. Он тоже обнаружил физическое сходство звезд в цепочках и оценил расстояние между ними: десятые и сотые доли светового года. Сами цепочки, изученные Д. Я. Мартыновым и Э. А. Дибаем, находились от нас на расстояниях 1500—2500 световых лет. Сходные результаты получил и мексиканский астроном П. Пишмиш.

И все же далеко не все астрономы поверили в реальность звездных цепочек. На конгрессе в Льеже в сентябре 1953 г. французские астрономы Э. Шацман и В. Курганов объявили, что их коллега Ш. Ференбах на обсерватории Верхний Прованс не подтвердил результаты В. Г. Фесенкова и Д. А. Рожковского. Но наблюдения Ференбаха не были почему-то опубликованы. В. Курганов критиковал и оценку плотности вещества в волокнах, полученную В. Г. Фесенковым. Советский ученый признал ошибку и исправил ее. Однако после 1958 г. интерес к звездным цепочкам как-то сразу начал остывать. Внимание ученых переключилось на другие объединения звезд, открытые тоже в Советском Союзе и даже раньше, чем звездные цепочки. Мы пока ничего не говорили об этом открытии, потому что оно заставило совсем по-иному посмотреть на возможный процесс зарождения звезд. Но теперь пришла пора о нем рассказать.

Открытие, сделанное в Бюракане

В конце 30-х годов профессор Ленинградского университета В. А. Амбарцумян изучал вопрос об устойчивости рассеянных звездных скоплений. Скопления эти по составу немногочисленны — в них насчитывают немногие сотни звезд. Примерами их являются Плеяды, Гиады, Ясли и двойное скопление χ и η Персея. Именно это скопление и привлекло внимание молодого профессора (Амбарцумяну тогда только исполнилось 30 лет). Его поразило, что вокруг этого скопления сгруппировалось подозрительно много горячих бело-голубых сверхгигантов классов O и B0 — несколько десятков.

Заняться этой проблемой тут же Амбарцумян не мог: он дописывал свой курс теоретической астрофизики. А затем наступила война, нужно было эвакуировать универси-

тет в Елабугу (Амбарцумян был проректором университета). В 1943 г. он вернулся на родину, в Армению, полный творческих замыслов. Под его руководством в 1946 г. в 35 км от Еревана, на южном склоне горы Арагац, на высоте 1500 м над уровнем моря, началось строительство Бюраканской астрофизической обсерватории. Вокруг Амбарцумяна сплотился коллектив талантливых молодых ученых. Строились и устанавливались новые телескопы.

27 октября 1947 г. член-корреспондент АН СССР В. А. Амбарцумян выступил на общем собрании Академии наук СССР, посвященном тридцатилетию Великой Октябрьской социалистической революции, с докладом на тему «Современная астрофизика и космогония».

Идеи В. А. Амбарцумяна, изложенные в этом докладе (изданном спустя три месяца отдельной брошюрой под названием «Эволюция звезд и астрофизика»), настолько важны и интересны, что на них надо остановиться подробнее.

Как строились космогонические гипотезы в прошлом? Для объяснения какого-то явления привлекалась некая идея, которая развивалась, разрабатывалась, нацеленная специально на то, чтобы объяснить именно это явление. Космогонисты прошлого (да и многие современные) чрезмерно увлекались такими предвзятыми идеями и не придавали большого значения накоплению и кропотливому анализу фактов, на первый взгляд (но только на первый!) не связанных с изучаемым явлением. А между тем именно такой анализ необходим в первую очередь. Космогонист должен быть широко эрудированным астрофизиком, он должен уметь сопоставлять и анализировать факты, не увлекаться искусственными, спекулятивными построениями.

Мы уже приводили примеры удачных решений труднейших космогонических задач. Один из лучших таких примеров комплекса явлений, казавшихся сперва независимыми одно от другого, но имевших глубокую внутреннюю связь, был приведен во II главе (сверхновые — радиотуманности — космические лучи — межзвездные магнитные поля — происхождение элементов — нейтрино). Но все это стало известно спустя несколько лет. В. А. Амбарцумян в своем докладе приводил другие примеры.

Как решить проблему происхождения звезд? Можно постулировать, как это делали многие, что звезды образуются из туманностей — газовых и пылевых. Но будет ли это ответом на вопрос? Нет, пока мы не найдем факты, которые бы это доказывали.

А о чем говорят факты? В. А. Амбарцумян начал с результатов анализа двойных систем, выполненного им самим и П. П. Паренаго десятью годами раньше. Как мы уже говорили (стр. 51), этот анализ приводил к выводу, что возраст двойных систем не превосходит нескольких миллиардов лет и что эти системы несомненно имеют о б щ е п р о и с х о ж д е н и е. Дальше докладчик перешел к рассеянными (открытым) звездным скоплениям. Тот же анализ говорил, что их возраст не превосходит миллиардов, а в некоторых случаях сотен миллионов лет. Действие поля тяготения звезд Галактики, окружающих скопление, близкие прохождения отдельных звезд — все это будет со временем вырывать из скопления то одну, то другую звезду, и скопление постепенно будет распадаться. При этом карлики (звезды малой массы) будут уходить из скопления быстрее, чем гиганты. Но вот скопление χ и η Персея как раз богато карликами. Значит, они еще не успели покинуть скопление, а следовательно, оно сравнительно молодое.

Есть в пользу этого и еще один, гораздо более сильный аргумент. Как мы помним, вокруг этого скопления расположено несколько десятков сверхгигантов классов O и $B0$ (рис. 37). Диаметр этой ассоциации сверхгигантов — около 650 световых лет. Такая ассоциация динамически неустойчива и должна скоро распасться. Значит, она образовалась недавно. Кроме того, среди горячих звезд других ассоциаций встречаются звезды типов Вольфа — Райе и R Лебеда, которые не могут иметь возраст больше десятков миллионов лет, а то и меньше. Отсюда вытекает, что и сами ассоциации, и звезды, из которых они состоят, молоды. А следовательно, они образуются и в наше время. Что такое миллион или десять миллионов лет для Галактики, которая существует во много тысяч раз дольше? То же, что три дня или месяц в жизни человека. Значит, эти звезды в буквальном смысле новорожденные младенцы, а ассоциация — своего рода родильный дом, где находится много младенцев, но который они неизбежно должны будут покинуть спустя несколько дней (т. е. миллионов лет).

Человек, ничего не знающий о назначении родильного дома, но систематически наблюдающий за ним снаружи, скоро установит, что: а) в этом доме много младенцев и б) они все время покидают дом, хотя никто их туда не завозит. Отсюда он сделает вывод, что они именно там рождаются.

Примерно в таком же положении оказались В. А. Амбарцумян и его сотрудник Е. Е. Маркарян, изучая звездные

ассоциации. Они видели, что перед ними звезды-младенцы и что они должны покинуть ассоциацию (это было вскоре подтверждено непосредственными наблюдениями за движением звезд в ассоциациях). И они сделали единственный правильный вывод: звезды рождаются в ассоциациях. Ассоциации для них — настоящие родильные дома.

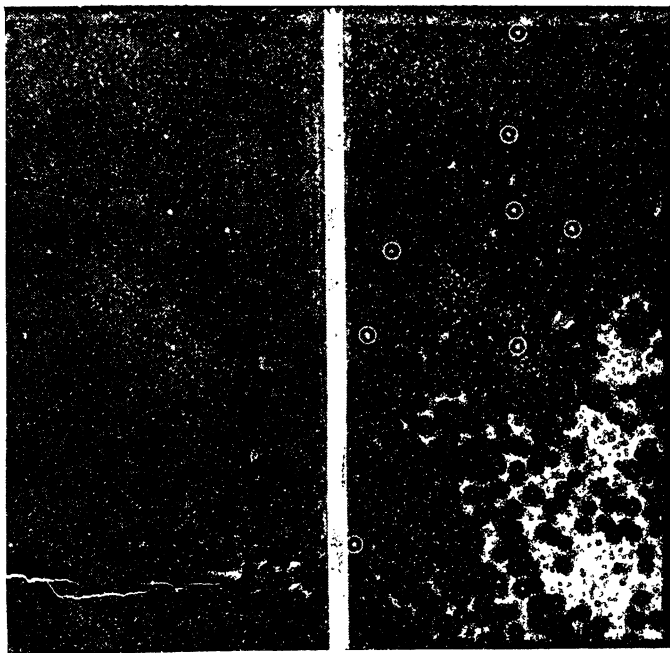


Рис. 37. Звездная ассоциация в скоплении χ и η Персея; на правом снимке члены ассоциации обведены кружками.

Но из того факта, что все сверхгиганты классов О и В, входящие в ассоциации, — молодые звезды, вовсе не следовал обратный вывод, что все молодые звезды — сверхгиганты классов О и В. Амбарцумян и Маркарян выяснили, что молодыми могут быть и звезды-карлики.

Еще в прошлом веке была обнаружена слабая неправильная переменная звезда — красный карлик Т Тельца. Как это часто бывает, долгое время на нее никто не обращал внимания.

В 1932 г. П. П. Паренаго выделил тип звезд RW Возничего для обозначения неправильных переменных звезд класса G с быстрыми (до одной звездной величины в течение нескольких часов) и большими (3—4 звездные величины) изменениями блеска. Многие из них оказались связанными с темными и светлыми диффузными туманностями. К ним принадлежала и звезда Т Тельца.

В 1945 г. американский астроном А. Джой опубликовал работу «Переменные звезды типа Т Тельца», в которой сформулировал следующие признаки, заставившие его выделить эти звезды из типа RW Возничего в отдельный тип: 1) неправильные изменения блеска в пределах трех звездных величин; 2) спектр класса F (точнее, от G5 до F5) с линиями излучения водорода, ионизованного кальция и некоторых других элементов; 3) низкая светимость; 4) связь с темной или светлой туманностью. Джой же обратил внимание на то, что семь звезд типа Т Тельца образуют связанную систему размерами 30—60 световых лет.

В. А. Амбарцумян и его сотрудники изучили все данные о звездах типа Т Тельца и пришли к выводу о том, что они тоже образуют ассоциации. В отличие от O-ассоциаций, состоявших из горячих бело-голубых сверхгигантов, эти ассоциации красных карликов типа Т Тельца получили название T-ассоциаций. Их возраст был оценен как не превосходящий ста миллионов лет.

Примерно половина звезд типа Т Тельца оказались визуально-двойными. Спутниками переменных звезд оказались еще более слабые красные карлики класса M с яркими линиями в спектре. Поскольку компоненты двойной системы имеют общее происхождение, можно было считать, что эти красные карлики — тоже молодые звезды, что они, как и звезды типа Т Тельца, еще не достигли главной последовательности и находятся в стадии гравитационного сжатия.

В. А. Амбарцумян обратил внимание на то, что красные карлики не могут быть видны издалека из-за их низкой светимости. Это значит, что действительное число T-ассоциаций намного превышает видимое. Подробное исследование T-ассоциаций выполнил московский астроном П. Н. Холопов, ученик и сотрудник П. П. Паренаго и Б. В. Кукаркина. В его список вошли 23 ассоциации, объединявшие 680 звезд (от четырех до 255 звезд в каждой ассоциации). Но общее число T-ассоциаций в Галактике, по оценке

В. А. Амбарцумяна, должно измеряться многими тысячами, а число звезд в них — миллионами.

Тогда же, в своем докладе 27 октября 1947 г., В. А. Амбарцумян поставил самый трудный вопрос: из чего и каким образом происходит образование звездных ассоциаций и открытых звездных скоплений? Поскольку никто не наблюдал светящихся объектов большой массы, из которых могли бы образоваться несколько десятков или сотен звезд, оставались две возможности:

а) первоначальные тела были большие, но темные или слабосветящиеся, например темные туманности;

б) эти тела имели небольшие размеры, но сравнительно высокую плотность и по каким-то причинам разделились, образовав звезды ассоциации.

Обе гипотезы имели свои трудности, и В. А. Амбарцумян не скрывал их. Но в дальнейшем он отдал предпочтение второй гипотезе. Возможно, потому, что не было никаких признаков образования звезд из диффузной материи (на это он сам указывал не раз). О природе дозвездных тел он много думал. Разные идеи приходили в голову. Недоставало фактов. Вдруг обнаруживались новые факты, открывались новые объекты, новые связи. Сенсацией облетело мир известие об открытии методами радиоастрономии множества дискретных источников радионизлучения, которые тогда называли радиозвездами. Они не выделялись в оптическом диапазоне, но излучали в радиодиапазоне. Так, может быть, радиозвезды — это и есть дозвездные тела? Но вскоре это предположение пришлось забраковать — «радиозвезды» оказались вовсе не звездами и не звездopodobными объектами, а частично радиотуманностями типа Крабовидной, отчасти же — радиогалактиками (было еще далеко до открытия квазаров).

И все-таки Амбарцумян продолжал считать дозвездные тела сверхплотными, а не разреженными образованиями. Со своим сотрудником (ныне членом-корреспондентом Академии наук Армянской ССР) Г. С. Саакяном он начал разрабатывать теорию этих тел. Об этих поисках мы расскажем дальше.

А пока заметим, что, предложив гипотезу сверхплотных дозвездных тел, В. А. Амбарцумян нарушил им же провозглашенный принцип: исходить только из анализа фактов, а не из умозрительных построений. Впрочем, надо отдать справедливость этому замечательному ученому: во всех своих статьях и выступлениях В. А. Амбарцумян

отнюдь не настаивал на своей точке зрения по этому вопросу и прямо говорил, что мы пока не имеем необходимых фактических данных для окончательных суждений о природе дозвездных тел.

Но главное в открытии звездных ассоциаций было не то, и з ч е г о рождаются звезды, а то, что они рождаются группами (ассоциациями) и что этот процесс происходит постоянно, происходит он и в н а ш е в р е м я. Важно было и то, что таким путем образуются звезды р а з н о й м а с с ы и ф и з и ч е с к о г о с т р о е н и я, разных классов.

За открытие звездных ассоциаций В. А. Амбарцумян и Б. Е. Маркарян были удостоены в 1950 г. Государственной премии.

Но не все шло гладко и спокойно в исследованиях звездных ассоциаций — над результатами бюраканских астрономов уже нависало облако критики. А вскоре этот вопрос стал предметом ожесточенного спора.

Спор о звездных ассоциациях

Основным оппонентом В. А. Амбарцумяна выступил московский профессор Б. А. Воронцов-Вельяминов, о работах которого мы уже не раз рассказывали. Будучи специалистом по физике звезд и туманностей, Воронцов-Вельяминов внимательно следил за работами Амбарцумяна и его школы. И вот с конца 1949 г. он начал выступать и публиковать статьи с довольно резкими критическими замечаниями, направленными на опровержение идеи о звездных ассоциациях.

Концепция Б. А. Воронцова-Вельяминова состояла в следующем. Никаких особых объединений горячих сверхгигантов (звездных ассоциаций) не существует. Имеются давно и хорошо изученные рассеянные звездные скопления, куда входят, между прочим, и сверхгиганты классов O и B0. Распределение этих звезд в Галактике неравномерно, поэтому кое-где могут возникать флуктуации плотности, ошибочно принимаемые бюраканскими астрономами за ассоциации. Кроме того, массы темной диффузной материи маскируют от нас значительную часть расположенных сравнительно далеко звезд-гигантов, оставляя в просветах «коридоры видимости», в которых мы могли заметить кажущиеся концентрации горячих гигантов, опять же принимаемые по ошибке за ассоциации.

Такова была общая точка зрения Б. А. Воронцова-Вельяминова. Но он не ограничился, разумеется, высказыванием общих соображений. Опираясь на фактические данные, приводя таблицы, карты, схемы, Воронцов-Вельяминов подверг критическому анализу заключения бюраканских астрономов об отдельных звездных ассоциациях. В некоторых случаях у них обнаружился явные ошибки. Так, в созвездии Единорога сперва была объявлена одна звездная ассоциация, но потом выяснилось, что в этом направлении на разных расстояниях от нас находятся две ассоциации. Сравнив расстояния до звезд предполагаемой ассоциации в Единороге, Воронцов-Вельяминов получил вполне устраивавший его результат: большой разброс расстояний, того же порядка, что и самые расстояния.

Тут мы должны ясно представить себе, что сверхгиганты классов O и $B0$, входившие в O -ассоциации, находятся от нас на довольно больших расстояниях: от 1300 до 6500 световых лет. Определять эти расстояния прямым методом — путем измерения параллаксов — было невозможно. Для этой цели использовался спектроскопический метод: по спектру определялась светимость звезды (на основании $G-R$ -диаграммы), а по ней и видимому блеску — расстояние. Учитывалась и поправка за межзвездное поглощение света, ослабляющее блеск звезды, — по ее кажущемуся покраснению. Но так как разброс звезд O и $B0$ на $G-R$ -диаграмме по их светимостям довольно велик, большие ошибки в определяемых расстояниях были неизбежны.

Для проверки полученных расстояний Б. А. Воронцов-Вельяминов применил следующий метод. Звезды-гиганты участвуют во вращении Галактики. Поэтому в их движении должна быть составляющая скорости, направленная по лучу зрения, величина которой пропорциональна расстоянию до звезды (ведь мы измеряем скорость не относительно центра Галактики, а относительно Солнца, т. е. разность скоростей звезды и Солнца). Проверка этим методом показала, что расстояния до звезд определены в среднем правильно. Это подтверждало как будто взгляд Воронцова-Вельяминова на ассоциации как на физически не связанные между собой группы звезд, лишь случайно проектирующиеся на одни и те же участки неба.

Затем Б. А. Воронцов-Вельяминов проверил результат, полученный молодым бюраканским астрономом Г. А. Гурзадяном, который попытался обнаружить расширение звездных ассоциаций. Результат Гурзадяна был положительный,

но независимой проверки он не выдержал: молодой ученый допустил ошибку и вынужден был признать ее. Признал ее и В. А. Амбарцумян.

Но с критикой Б. А. Воронцова-Вельяминова по другим вопросам В. А. Амбарцумян не согласился и вступил с ним в жаркий поединок. Борьба велась на научных собраниях и на страницах научной печати. Амбарцумян приехал в Москву, выступил в Астрономическом институте им. П. К. Штернберга. Сейчас же после его доклада взял слово Воронцов-Вельяминов. А затем оба противника по очереди подходили к доске, выдвигали друг другу возражения и контрвозражения, показывали фотографии, схемы, таблицы. В ноябре 1951 г. была организована специальная дискуссия в Бюракане. Но все это было только прелюдией ко Второму совещанию по вопросам космогонии, собравшемуся в Москве в мае 1952 г. специально для обсуждения проблемы происхождения звезд.

Да, спор между В. А. Амбарцумяном и Б. А. Воронцовым-Вельяминовым, занимавший умы всех астрономов того времени, не походил ни на дискуссию о «возрасте Вселенной» между Джинсом, Эддингтоном и Милном, ни на «гроссмейстерский матч» между С. А. Жевакиным и Д. А. Франк-Каменецким, происходивший двумя годами позднее. Этот спор напоминал скорее поединок двух рыцарей, закованных в броню. Вот уже сломаны копья, противники обнажили мечи, используют все свое искусство, выдержку, силу, бьются с небывалым упорством и вдохновением.

Но ученый мир не оставался пассивным наблюдателем этой схватки. Уже слышатся боевые кличи в других местах, и поединок перерастает в групповой турнир, где скрещиваются шпаги нескольких десятков участников.

В дискуссии по проблеме происхождения звезд, состоявшейся в Москве в мае 1952 г., приняли активное участие 37 ученых. Еще семерым не хватило времени для выступлений — тексты их выступлений были потом опубликованы в «Трудах» совещания, которые составили толстый том в 580 страниц.

Дискуссия открылась большим докладом В. А. Амбарцумяна. За четыре года исследований бюраканские и некоторые другие астрономы собрали много новых данных о звездных ассоциациях, исправили ошибки, уточнили прежние представления. Амбарцумян нарисовал широкую картину положения в звездной космогонии, дал анализ

и критику различных направлений исследований, гипотез советских и зарубежных ученых.

Но вот докладчик перешел к звездным ассоциациям. Он начал с Т-ассоциаций, описал их свойства. Затем обратился к О-ассоциациям и стал бросать на чашу весов факт за фактом, доказывая физическую реальность этих образований. Ведь, в отличие от рассеянных звездных скоплений, О-ассоциации не выделяются численностью своих членов на общем фоне звезд: их численность сравнительно невелика, но они связаны между собой общностью физических признаков.

Представим себе район города, где над большинством трех-пятиэтажных домов возвышается несколько 16-этажных зданий примерно одинаковой архитектуры. Эти высотные дома подобны звездам-гигантам в О-ассоциации. А звездное скопление можно уподобить густо застроенному району (домами примерно одинаковой этажности), выделяющемуся на фоне более редко застроенных кварталов.

Посмотрим теперь на звезды О-ассоциаций с другой точки зрения. На всем небе есть только шесть звезд классов О и В0 ярче 2,5 звездной величины. Три из них образуют знаменитый «пояс Ориона». Они расположены в ряд, на равных расстояниях друг от друга. Неужели это случайность? Идем дальше. Ярче 5-й звездной величины, опять же на всем небе, имеется лишь 25 звезд тех же классов. Но в созвездии Ориона, занимающем по площади 1/200 небесной сферы, таких звезд девять, т. е. более трети всех звезд. Значит, в Орионе мы имеем реальную звездную ассоциацию. Расстояние до нее около 1100 световых лет, диаметр ассоциации — около 300 световых лет.

А вот еще пример. К северу от небесной параллели $\pm 40^\circ$ есть всего 15 звезд класса О. Шесть из них образуют резко выраженную ассоциацию в Цефее (Цефей II), на расстоянии 1900 световых лет от нас.

Или вот ассоциация в Лебеде. Это одна из самых богатых О-ассоциаций: она содержит свыше ста горячих звезд классов О, В0—В5 и Вольфа — Райе. Кстати, из ста известных нам звезд Вольфа — Райе в эту ассоциацию входит десять, причем пять из них имеют почти одинаковые звездные величины (а значит, находятся от нас почти на одном расстоянии).

Как правило, внутри О-ассоциаций имеются звездные скопления, которые В. А. Амбарцумян назвал ядрами

ассоциаций. Некоторые ассоциации имеют несколько ядер. Хороший пример — двойное скопление χ и h Персея.

О- и Т-ассоциации не всегда независимы друг от друга. Как показал П. П. Паренаго, О-ассоциация в Орione содержит много звезд типа Т Тельца, т. е. является одновременно и Т-ассоциацией. То же можно сказать и об ассоциации Единорог I.

О-ассоциации видны лишь в «окнах прозрачности», утверждает Б. А. Воронцов-Вельяминов? Ничуть не бывало:

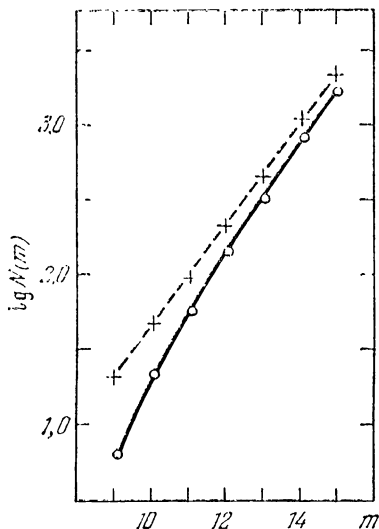


Рис. 38. Кривые численности звезд в функции их блеска в ассоциации Лебедь I и в контрольной области (по В. А. Амбарцумяну).

сравните подсчеты числа звезд до данной величины в области ассоциации Лебедь I и в контрольной области — для слабых звезд кривые идут почти идентично, значит, это не «окно прозрачности». А вот для ярких звезд кривая в ассоциации проходит заметно выше, значит, их сгущение здесь реально (рис. 38).

Можно сделать и другую проверку. В том же Лебеде есть действительно более прозрачные участки, где видно много далеких цефеид. Но звезд О-ассоциаций там нет, и, наоборот, там, где мы наблюдаем О-звезды, цефеиды почти не встречаются. А если бы была верна гипотеза «окон прозрачности», мы скорее всего видели бы рядом те и другие звезды.

— Нет, мы не скрываем наших ошибок, — продолжал В. А. Амбарцумян. Вот некоторые из них (и он привел примеры). Мы благодарны за критические замечания В. А. Воронцову-Вельяминову и другим ученым. Но основные наши выводы остаются прежними.

В звездных ассоциациях часто встречаются кратные звезды типа Трапеции в Орione (рис. 39). Они отличаются от других кратных систем тем, что расстояния между всеми звездами системы одного порядка. Встречаются и звездные

цепочки. Только в отличие от цепочек В. Г. Фесенкова, состоящих из звезд-карликов, наши цепочки состоят из гигантов. То и другое очень интересно. Наличие цепочек разного состава доказывает, что звезды, как правило, образуются группами, но вступают на главную последовательность в разных ее местах.

Из чего образуются звезды? Этого мы еще не знаем. Может быть, из диффузных туманностей, из глобул, но

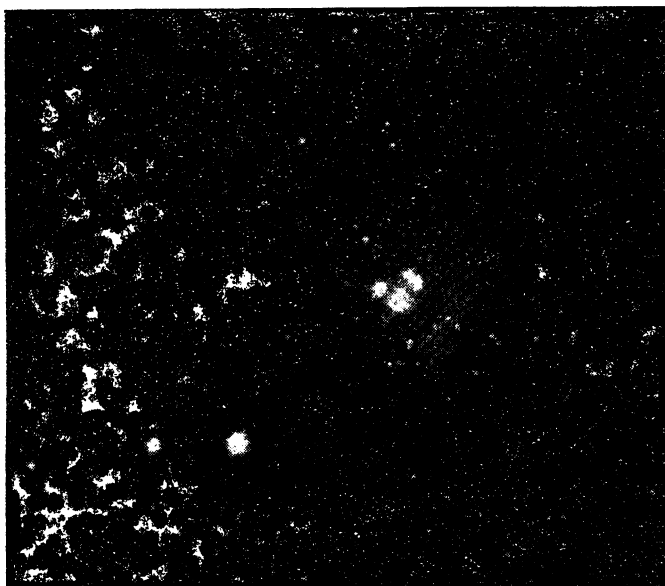


Рис. 39. Трапеция в Орионе.

скорее всего — из сверхплотных дозвездных тел. Их массы должны быть гораздо больше масс обычных звезд, даже гигантских. Но разве не могут существовать такие тела? Массы новых, по Э. Р. Мустелю, составляют сотни, а то и тысячи масс Солнца, а массы сверхновых — порядка $10^5 M_{\odot}$. Надо посмотреть, не наблюдается ли какая-либо связь этих объектов со звездными ассоциациями.

Увы, здесь, как мы знаем, Э. Р. Мустель ошибался, а вместе с ним ошибался и В. А. Амбарцумян. Массы новых и сверхновых оказались гораздо меньше (стр.130). Но спустя

11 лет были открыты сверхплотные тела с куда большей массой — квазары, так что в принципе В. А. Амбарцумян не сделал ошибки, предположив существование подобных тел во Вселенной.

На другой день выступил Б. А. Воронцов-Вельяминов. Он отнюдь не собирался признать себя побежденным. Оговорив сразу, что он не будет рассматривать Т-ассоциации, поскольку звездами типа Т Тельца он никогда не занимался, Б. А. Воронцов-Вельяминов начал критиковать взгляды докладчика на природу О-ассоциаций. Он продолжал защищать концепцию коридоров видимости, приводя в ее пользу карты распределения горячих гигантов на фоне облаков Млечного Пути (именно там было больше всего гигантов, а в других местах все скрывала пылевая материя). Признавая существование реальных сгущений гигантов, Воронцов-Вельяминов полагал, что они делятся на два типа: давно известные звездные скопления и сгущения более крупного масштаба — звездные облака, из которых состоит спиральный рукав нашей Галактики (а также других галактик).

После того как два основных докладчика высказались, начались выступления остальных участников совещания. А. И. Лебединский и Л. Э. Гуревич, не отрицая существования звездных ассоциаций, оспаривали точку зрения В. А. Амбарцумяна на природу дозвездных тел и изложили свою теорию происхождения звезд из диффузной материи — на ней мы остановимся в следующем разделе. В. Г. Фесенков рассказал о своих исследованиях звездных цепочек. И вообще многие участники дискуссии не столько спорили о звездных ассоциациях и происхождении звезд, сколько привели полученные ими из наблюдений или теоретических расчетов новые факты или результаты, которые могли помочь решению поставленной проблемы.

К наиболее интересным сообщениям такого рода безусловно следует отнести выступления академика Г. А. Шайна и его сотрудницы В. Ф. Газе, рассказавших о результатах исследований газовых туманностей на Крымской астрофизической обсерватории. Прежде всего они определили массы этих туманностей в других галактиках и нашли, что они заключены в пределах от многих сотен до десятков тысяч солнечных масс. Далее было установлено, что в газовых туманностях концентрируется много белых и голубых сверхгигантов классов О и В0. Г. А. Шайн и В. Ф. Газе рассчитали, что на каждую такую звезду приходится

в десятки и сотни раз большее (по массе) количество газа. Не приходилось сомневаться, что эти сверхгиганты, во-первых, образуют О-ассоциации в том смысле, который придавал им В. А. Амбарцумян, а во-вторых, что они генетически связаны между собой и с окружающей их туманностью. «Совершенно очевидно, — заявил академик Шайн, — что это — не звездные скопления в обычном смысле и не звездные облака. По размерам они на порядок или более превышают звездные скопления и на порядок или более уступают звездным облакам. Наконец, выдвинутые против гипотезы ассоциаций такие возражения, как влияние темной материи, окон видимости, коридоров прозрачности, можно считать в данном случае совершенно оппавшими».

Это заявление академика Шайна — опытного наблюдателя, строгого к себе и своим выводам ученого, за всю свою долгую научную деятельность не предложившего ни одной гипотезы, — имело решающее значение для торжества идей В. А. Амбарцумяна, связанных со звездными ассоциациями. А впереди были другие выступления сторонников этой идеи: П. Н. Холопова, В. А. Крата, Э. Р. Мустеля. Интересные данные о распределении горячих гигантов в Млечном Пути по наблюдениям в Крымской астрофизической обсерватории, свидетельствующие в пользу реальности О-ассоциаций, привели Э. С. Бродская и И. М. Копылов. Наконец, своеобразным «резервом главного командования» явилось выступление ближайшего сотрудника В. А. Амбарцумяна — Б. Е. Маркаряна, который представил фактические данные о полутора тысячах горячих гигантов классов О—В2: их расположение на небе, расстояния от нас, спектры, показатели цвета. Б. Е. Маркарян подробно описал все выявленные в Бюракане сгущения этих гигантов, сообщил о наличии или отсутствии сильного поглощения в этих областях, а затем ответил на возражения Б. А. Воронцова-Вельяминова. Он привел ряд примеров систем горячих звезд в Большом Магеллановом Облаке, которые не могут считаться звездными скоплениями, но представляют собой прекрасный пример О-ассоциаций.

Спор о звездных ассоциациях несколько отодвигал на задний план, как это ни странно, ту проблему, ради которой он был организован, — проблему происхождения звезд. И все же различные подходы к решению этой проблемы прозвучали в выступлениях участников совещания. О них мы расскажем чуть позже.

К концу четвертого дня работы совещание приняло решение, в котором отметило «плодотворность представления о том, что процесс группового звездообразования в Галактике продолжается и в настоящее время. Это представление было впервые выдвинуто В. А. Амбарцумяном на основе его теории о существовании и распаде звездных ассоциаций. Оно послужило мощным толчком к изучению газовых туманностей и их связи с горячими звездами (академик Г. А. Шайн с сотрудниками), изучению движения Трапедии туманности Ориона (П. П. Паренаго), изучению распределения в пространстве звезд-гигантов, а также тех затруднений, которые возникают при этом изучении вследствие наличия темной материи и коридоров видимости (Б. А. Воронцов-Вельяминов)». Далее в решении было указано, что «впервые в истории звездной космогонии на основе изучения ассоциаций теоретически предсказаны качественно новые явления и имеются указания на подтверждение их наблюдениями».

Здесь имелись в виду в первую очередь наблюдения голландского астронома А. Блау, который в 1952 г. подтвердил расширение ассоциации Персей II (вокруг звезды ζ Персея), а затем и ряда других ассоциаций. П. П. Паренаго обнаружил расширение Трапедии Ориона, Б. Е. Маркарян — ассоциации Цефей II. Позже А. Блау и У. Морган обнаружили любопытную тройку «звезд-беглецов»: они находились в разных созвездиях, но обладали очень большими собственными движениями. Это были звезды АЕ Возничего, μ Голубя и 53 Овна. Скорости их движения были заключены в пределах 73—128 км/сек (напомним, что скорость нашего Солнца равна 20 км/сек). Продолженные назад, их пути пересеклись в созвездии Ориона, где расположена одна из самых обильных ассоциаций. Блау и Морган рассчитали, что 53 Овна вылетела из области Трапедии Ориона 4,8 миллиона лет назад, а две другие звезды — несколько позже, 2,6 миллиона лет назад.

Дискуссия о звездных ассоциациях не закончилась на Втором совещании по вопросам космогонии в мае 1952 г. Б. А. Воронцов-Вельяминов еще три года продолжал оспаривать правильность выводов В. А. Амбарцумяна и его школы, а также тех ученых, которые разделяли взгляды бюраканских астрономов на звездные ассоциации. Попытался он подвергнуть сомнению и наблюдения Блау. Некоторые его критические замечания были, как и раньше, справедливы, но опровергнуть всю идею в целом они не могли.

А впрочем, разве настоящий ученый может ограничиться ролью критика? Наука не знает еще своих Белинских. И Воронцову-Вельяминову предстояло вскоре сделать выдающееся открытие, равное по своему значению открытию звездных ассоциаций, — мы имеем в виду открытие взаимодействующих галактик. О нем мы расскажем в гл. IV.

В. А. Амбарцумян выиграл сражение*). И закономерным признанием его научных заслуг явилось избрание его 23 октября 1953 г. академиком. А после оглашения результатов выборов на общем собрании Академии наук СССР президент Академии А. Н. Несмеянов объявил:

— Переходим к следующему пункту повестки дня. Доклад «О происхождении звезд» делает академик Амбарцумян.

Исходный материал — газ?

А как же рассматривали в эти годы (1947—1953) проблему происхождения звезд зарубежные ученые? Взгляды и гипотезы здесь существовали весьма разнообразные.

Западногерманский физик-идеалист П. Йордан издал, например, в 1947 г. в Штутгарте книгу «Происхождение звезд», в которой утверждал, что звезды возникают из ничего. Он писал: «Продолжающееся возрастание материи в космосе происходит как взрывное образование новых звезд, которые появляются при этом как целые и неожиданно». Здесь слово «новых» употреблено в буквальном смысле.

Скажем прямо: в те годы у нас было слишком модно все зарубежные идеи и гипотезы объявлять идеалистическими. Нередко к доказательству этого положения и сводилась вся их критика.

Творческий подход, провозглашенный В. А. Амбарцумян и подхваченный большинством советских астрономов, требовал критики не только ошибочных философских идей, но и ошибочных космогонических гипотез, которые либо вытекали из этих идей, либо приводили к ним. Идея Йордана была откровенно идеалистическая, поскольку в ней прямо и неприкрыто признавалась возможность образования звезд из ничего. В более замаскированной форме

*) Когда рукопись этой книги уже была написана, В. А. Амбарцумян заявил, что он не согласен с такой постановкой вопроса: «Побеждает не ученый, а идея, которую он защищал». Конечно, правильная идея всегда проложит себе дорогу, но многое зависит и от того, кто и как будет ее защищать.

та же идея пронизывала работы так называемой кембриджской школы, возглавлявшейся известным английским астрофизиком Ф. Хойлом.

Хойл и другие представители этой школы (Г. Бонди, Т. Голд, Р. Литтлтон) считали, что по мере «расширения» Вселенной средняя плотность вещества в ней не уменьшается, а остается постоянной за счет образования материи из ничего. Правда, кембриджцы утверждали, что не совсем из ничего, а из какого-то С-поля, но доказать этого не могли и впоследствии сами отказались от своих взглядов.

Происхождение звезд Хойл представлял себе следующим образом. Звезды образуются за счет конденсации межзвездного газа. Возникающие таким путем звезды имеют сравнительно малую массу, но они ее пополняют за счет поглощения (а к к р е ц и) диффузного вещества по мере движения сквозь туманность. Межзвездный газ, таким образом, служит для звезд как бы «питательной средой». Образование тесных пар двойных звезд Хойл и его коллеги объясняли тем, что по мере увеличения масс обеих компонент широкой вначале пары (за счет «питания» межзвездным газом) широкие пары сближались и превращались в тесные.

В. А. Амбарцумян и другие советские ученые резко критиковали взгляды Хойла и его школы, приводя, в частности, примеры звезд и их систем, которые никак не укладывались в схему Хойла. Например, было известно несколько т р о й н ы х звезд, в которых главная звезда — гигант, а на довольно большом расстоянии от нее расположена тесная пара звезд-карликов. Если бы была верна схема Хойла, звезда-гигант, «обрастая» поглощенной массой, должна была в первую очередь сблизиться с одной из двух других звезд. Почему же тесную пару образовали карлики? Было много и других фактов, не объяснявшихся гипотезой Хойла.

Другой крупный зарубежный космогонист К. Вейцзекер выступил в 1951 г. с гипотезой, в которой пытался объяснить формирование звезд (опять же из межзвездного газа) явлениями турбулентности.

Мы знаем, что учитывать турбулентность при изучении поведения больших газовых масс необходимо. Но Вейцзекер попробовал одним этим механизмом объяснить происхождение галактик, звездных скоплений, звезд и даже планет (его «вихревая» гипотеза происхождения планет до сих пор считается за рубежом самой обоснованной). Он рассматривал разделение турбулентных (вихревых)

ишек разных размеров в первоначально однородной диффузной среде, образование из них клочков вещества, которые сгущаются затем в звезды за счет гравитационного сжатия. Когда достаточное количество звезд образовалось, процесс звездообразования прекращается. В нашей Галактике это завершение формирования звезд произошло, по Вейцеккеру, давно. Звезды классов О и В не молодые, а только «омоложенные», поглотившие большие массы межзвездного газа за счет все той же аккреции, и так далее.

Гипотеза Вейцеккера, как и гипотеза Хойла, не могла объяснить множество наблюдаемых фактов, не говоря уже о том, что она не исходила из их анализа. Но в ней содержалась важная идея об учете явлений турбулентности.

В 1946—1949 гг. еще одну гипотезу об образовании звезд из газовой-пылевой материи Галактики предложил английский астрофизик К. Эджворт. Существенно новым в его гипотезе был учет влияния холодной пыли, отнимавшей тепло у более нагретого газа, что благоприятствовало образованию конденсаций (см. стр. 176). По схеме Эджворта, звезды образуются не непосредственно, а из сгущений гораздо большей массы, которые уже потом разделяются на звезды. Но тогда эти промежуточные сгущения мы могли бы наблюдать, хотя бы в других галактиках. Чувствуя слабость своей схемы, Эджворт видоизменил ее, предположив, что вращающиеся сгущения разбиваются на кольца, кольца превращаются в волокна, а уже из них возникают звезды. Слабость этой гипотезы заключается в ее надуманности, спекулятивности, отрыве от фактов. Даже открытие цепочек В. Г. Фесенкова не могло служить ее подтверждением, так как этап газовых волокон в ней — довольно второстепенный, и трудно допустить, что волокна, открытые Фесенковым, образовались из вращающихся газовых колец.

Таким образом, за рубежом попытки решить задачу происхождения звезд из межзвездного газа потерпели неудачу. Как же обстояло дело в Советском Союзе?

И здесь у этой идеи были свои сторонники. Мы знаем уже о работах В. Г. Фесенкова и Д. А. Рожковского, которые приводили в ее пользу данные наблюдений. Эту идею поддерживали в своих выступлениях и некоторые другие участники Второго совещания по вопросам космогонии.

Особенно интересны были попытки учесть действие сил, которым раньше не придавали большого значения. Так, С. Б. Пикельнер и С. А. Каплан, независимо от Вейцек-

та же идея пронизывала работы так называемой кембриджской школы, возглавлявшейся известным английским астрофизиком Ф. Хойлом.

Хойл и другие представители этой школы (Г. Бонди, Т. Голд, Р. Литтлтон) считали, что по мере «расширения» Вселенной средняя плотность вещества в ней не уменьшается, а остается постоянной за счет образования материи из ничего. Правда, кембриджцы утверждали, что не совсем из ничего, а из какого-то С-поля, но доказать этого не могли и впоследствии сами отказались от своих взглядов.

Происхождение звезд Хойл представлял себе следующим образом. Звезды образуются за счет конденсации межзвездного газа. Возникающие таким путем звезды имеют сравнительно малую массу, но они ее пополняют за счет поглощения (а к к р е ц и) диффузного вещества по мере движения сквозь туманность. Межзвездный газ, таким образом, служит для звезд как бы «питательной средой». Образование тесных пар двойных звезд Хойл и его коллеги объясняли тем, что по мере увеличения масс обеих компонент широкой вначале пары (за счет «питания» межзвездным газом) широкие пары сближались и превращались в тесные.

В. А. Амбарцумян и другие советские ученые резко критиковали взгляды Хойла и его школы, приводя, в частности, примеры звезд и их систем, которые никак не укладывались в схему Хойла. Например, было известно несколько т р о й н ы х звезд, в которых главная звезда — гигант, а на довольно большом расстоянии от нее расположена тесная пара звезд-карликов. Если бы была верна схема Хойла, звезда-гигант, «обрастая» поглощенной массой, должна была в первую очередь сблизиться с одной из двух других звезд. Почему же тесную пару образовали карлики? Было много и других фактов, не объяснявшихся гипотезой Хойла.

Другой крупный зарубежный космогонист К. Вейцзеккер выступил в 1951 г. с гипотезой, в которой пытался объяснить формирование звезд (опять же из межзвездного газа) явлениями турбулентности.

Мы знаем, что учитывать турбулентность при изучении поведения больших газовых масс необходимо. Но Вейцзеккер попробовал одним этим механизмом объяснить происхождение галактик, звездных скоплений, звезд и даже планет (его «вихревая» гипотеза происхождения планет до сих пор считается за рубежом самой обоснованной). Он рассматривал разделение турбулентных (вихревых)

ишек разных размеров в первоначально однородной диффузной среде, образование из них клочков вещества, которые сгущаются затем в звезды за счет гравитационного сжатия. Когда достаточное количество звезд образовалось, процесс звездообразования прекращается. В нашей Галактике это завершение формирования звезд произошло, по Вейцеккеру, давно. Звезды классов О и В не молодые, а только «омоложенные», поглотившие большие массы межзвездного газа за счет все той же аккреции, и так далее.

Гипотеза Вейцеккера, как и гипотеза Хойла, не могла объяснить множество наблюдаемых фактов, не говоря уже о том, что она не исходила из их анализа. Но в ней содержалась важная идея об учете явлений турбулентности.

В 1946—1949 гг. еще одну гипотезу об образовании звезд из газово-пылевой материи Галактики предложил английский астрофизик К. Эджворт. Существенно новым в его гипотезе был учет влияния холодной пыли, отнимавшей тепло у более нагретого газа, что благоприятствовало образованию конденсаций (см. стр. 176). По схеме Эджворта, звезды образуются не непосредственно, а из сгущений гораздо большей массы, которые уже потом разделяются на звезды. Но тогда эти промежуточные сгущения мы могли бы наблюдать, хотя бы в других галактиках. Чувствуя слабость своей схемы, Эджворт видоизменил ее, предположив, что вращающиеся сгущения разбиваются на кольца, кольца превращаются в волокна, а уже из них возникают звезды. Слабость этой гипотезы заключается в ее надуманности, спекулятивности, отрыве от фактов. Даже открытие цепочек В. Г. Фесенкова не могло служить ее подтверждением, так как этап газовых волокон в ней — довольно второстепенный, и трудно допустить, что волокна, открытые Фесенковым, образовались из вращающихся газовых колец.

Таким образом, за рубежом попытки решить задачу о происхождении звезд из межзвездного газа потерпели неудачу. Как же обстояло дело в Советском Союзе?

И здесь у этой идеи были свои сторонники. Мы знаем уже о работах В. Г. Фесенкова и Д. А. Рожковского, которые приводили в ее пользу данные наблюдений. Эту идею поддерживали в своих выступлениях и некоторые другие участники Второго совещания по вопросам космогонии.

Особенно интересны были попытки учесть действие сил, которым раньше не придавали большого значения. Так, С. Б. Пикельнер и С. А. Каплан, независимо от Вейцек-

кера, обратили внимание на возможную роль турбулентных движений вещества газовых туманностей в формировании протозвезд.

Они рассмотрели возможность применения к этой проблеме теории турбулентции, развитой выдающимся советским математиком академиком А. Н. Колмогоровым, на основе статистического анализа движений и флуктуаций яркости в газовых туманностях.

К. П. Станюкович указал на роль столкновений газовых облаков в образовании более плотных конденсаций, которые затем могут испытать гравитационное сжатие. Прохождение ударных волн при столкновении отдельных масс газа с ядром конденсации приведет к более интенсивному разогреванию этого ядра, чем при простом сжатии.

Наконец, А. Б. Северный, ссылаясь на исследования шведского астрофизика Х. Альвена, подчеркнул важность учета магнитных полей при рассмотрении образования зародышей звезд из газовых конденсаций. Напрашивалась следующая схема: в газовой туманности за счет турбулентных движений возникают неоднородности, а так как газ сильно ионизован, образуются магнитные поля, и принцип гравитационной неустойчивости, который сформулировал когда-то Джинс, надо заменить принципом магнитогравитационной неустойчивости. Приближенная теория этой задачи, изложенная А. Б. Северным, указывала на то, что зародыши звезд должны иметь вытянутую форму, — вот вам и объяснение газовых волокон и звездных цепочек.

Но наиболее развитое и полное теоретическое обоснование гипотезы происхождения звезд из диффузной материи было сделано в выступлениях на том же совещании и в ряде статей ленинградских астрофизиков профессоров А. И. Лебединского и Л. Э. Гуревича.

Мы уже не первый раз встречаемся с ними в нашей книге. Они разрабатывали теорию цефеид, теорию вспышек новых звезд. Кроме того, широкую известность приобрело их исследование процесса формирования планет из газопылевого облака согласно гипотезе академика О. Ю. Шмидта*). И все эти работы они выполняли вдвоем, дружным тандемом. А ведь они даже не работали в одном институте. А. И. Лебединский был астроном, астрофизик, Л. Э. Гу-

*) См. В. А. Бронштейн, Беседы о космосе и гипотезах, «Наука», 1968, гл. I.

ревич — физик, пришедший в астрономию. Они были совершенно непохожи друг на друга и тем не менее прекрасно сработались. Творческое содружество А. И. Лебединского и Л. Э. Гуревича продолжалось 12 лет (1946—1957), а потом внезапно распалось. Одной из причин этого был переезд А. И. Лебединского в Москву. После этого и вплоть до неожиданной трагической смерти А. И. Лебединского (в 1967 г.) ни один из них не сделал сколько-нибудь значительных исследований в области астрофизики и космогонии: А. И. Лебединский занялся изучением полярных сияний и космических лучей, Л. Э. Гуревич обратился к физике плазмы (лишь в самые последние годы он вновь вернулся к астрофизическим проблемам).

Но тогда, в 1951—1952 гг., оба они были в расцвете творческих сил. Им показалось, что они способны создать теорию образования звезд из газа, так же как годом раньше они создали теорию образования планет из пыли. Но если их планетная теория была оценена всеми космогонистами как очевидный успех и до сих пор сохраняет свое значение, то теория происхождения звезд рождалась в муках, которых не испытывали, увы, при своем рождении сами звезды.

Одной из основных и, пожалуй, самых важных предпосылок этой теории явилось введение критерия ограничения масс звезд. В самом деле, почему не бывает звезд с очень большими массами, ну, скажем, больше $60 M_{\odot}$? Критерий гравитационной неустойчивости, введенный в свое время Джинсом, определял лишь нижний предел масс, на которые может разделиться туманность, и ничего не говорил о верхнем пределе. Для каждого значения плотности газа у Джинса получались определенные массы сгущений, но он произвольно принимал, что образование галактик происходило при плотности газа 10^{-30} г/см^3 , а звезд — при плотности 10^{-24} г/см^3 . Ну, а почему не могли сформироваться какие-то гигантские тела с массами в миллионы масс Солнца при плотности газа 10^{-27} г/см^3 ?

Лебединский и Гуревич сумели доказать теорему, согласно которой звезда становится неустойчивой и не сможет существовать, если давление излучения в ней превысит газовое. Это дает предельную массу $M_k = \frac{20}{\mu^2} M_{\odot}$, где μ — средний молекулярный вес газа. Если звезда целиком состоит из водорода, то $\mu = 0,5$ и $M_k = 80 M_{\odot}$. Если положить, что звезда на 67% состоит из водорода и на 33% из гелия, то $\mu = 0,78$ и $M_k = 32 M_{\odot}$. Эти результаты неплохо

Связь горячих гигантов с газовыми туманностями, установленную академиком Г. А. Шайном и В. Ф. Газе, Лебединский и Гуревич истолковали как факт, подтверждающий их гипотезу. В качестве еще одного примера они приводили Плеяды — звездное скопление, содержащее много горячих гигантов, окруженных массами газа (рис. 40).



Рис. 40. Туманности в Плеядах.

Гуревич и Лебединский несколько не возражали против тезиса В. А. Амбарцумяна о групповом происхождении звезд. Да, звезды образуются группами, образуются и в

настоящее время, но не из сверхплотных дозвездных тел, которых пока никто еще не наблюдал, а из хорошо знакомого астрономам доброго старого межзвездного газа.

Точка зрения А. И. Лебединского и Л. Э. Гуревича подверглась на Втором совещании по вопросам космогонии суровой критике, хотя необходимость разрабатывать гипотезу происхождения звезд из диффузной материи никем не оспаривалась и даже была подчеркнута в решении совещания. Но самым слабым местом этой гипотезы было, без сомнения, привлечение аккреции как механизма, превращающего звезду-карлик в гиганта. Развитие теории звездной эволюции в последующие годы показало, как мы уже знаем из главы I, что в таком искусственном механизме нет необходимости, что звезда рождается гигантом или карликом в зависимости от своей начальной массы, что красные гиганты — закономерная стадия эволюции звезд.

Другим недостатком гипотезы Гуревича—Лебединского было использование лишь гравитационных, термодинамических и радиационных эффектов, без учета ряда явлений, описываемых газовой динамикой и космической электродинамикой. Об этом говорили многие участники совещания.

Дальнейший прогресс того направления в звездной космогонии, которое решало вопрос «из чего?» в пользу диффузной материи, определился в основном именно развитием исследований электродинамических и газодинамических эффектов.

Как же происходило дальнейшее развитие идей о происхождении звезд из межзвездного газа? В 1955 г. академик Г. А. Шайн, изучая фотографии звездного неба, вновь пришел к выводу, что молодые горячие звезды-гиганты и эмиссионные туманности, с которыми они связаны, образуются вместе, в едином процессе. Это предположение объясняло целый ряд фактов, в том числе наблюдаемое расширение туманностей. Но этим вопрос «из чего?» не снимался.

Продолжая работы академика Шайна, сотрудница Крымской астрофизической обсерватории И. И. Проник изучила в 1960 г. связь молодых звезд и звездных ассоциаций со спиральными рукавами Галактики, где плотность облаков межзвездного газа наибольшая. Почти все ассоциации связаны с газовыми облаками и находятся в спиральных рукавах. Это видно на примерах ассоциаций в Орпоне, в Лебеде, в Стрельце. Такая же картина наблюдается и в галактике Андромеды.

Уже к концу 50-х годов стало ясно, что само существование рукавов Галактики как устойчивых образований было бы невозможно без учета влияния магнитных полей на межзвездный газ. Образование звезд в рукавах являлось сильным аргументом в пользу гипотезы происхождения звезд из газа.

Но тогда возникает второй вопрос: «как?». Многие из тех, кто занимался этим вопросом после Лебединского и Гуревича, тоже исходили из механизма гравитационной конденсации, внося в него те или иные дополнения или усовершенствования.

Так, немецкий ученый Р. Эберт и американский ученый У. Мак-Кри в 1955—1957 гг. рассмотрели сжатие под воздействием внешнего давления. Например, давление окружающего горячего газа может привести к сжатию некоторой массы холодного газа и пыли в глобулу. Обычно глобулы бывают окружены облаками ионизованного водорода (зонами H II), которые в принципе могут сжать газ, состоящий из нейтрального водорода (зона H I), до такой плотности, при которой уже заработает механизм гравитационного сжатия Гельмгольца — Кельвина. Но такой процесс наталкивается на ряд трудностей. Ионизованный газ создается излучением горячей молодой звезды. А как образовалась она? Массы глобул не превосходят массы Солнца — как же образуются звезды-гиганты? Не надо забывать и о молекулярной стадии водорода при уплотнении газа и охлаждении его пылинками, о чем мы уже говорили выше, — она понижает критическую массу звезды. Наконец, как показал в 1958 г. Ф. Хойл, сжимающаяся масса газа будет в ходе сжатия дробиться на части*).

Советские астрономы Э. А. Дибай и Р. Е. Гершберг в 1958—1961 гг. учли еще одну возможность, приводящую к сжатию газа, — прохождение ударных волн. В частности, сходящаяся волна может привести к уплотнению, правда, сравнительно небольшой массы газа.

Мы уже говорили, что глобулы тесно связаны со «слоновыми хоботами» — темными, сужающимися отростками, окаймленными светлыми ободками, свечение которых возбуждается близкой горячей звездой. С другой стороны, молодые звезды типа Т Тельца связаны с маленькими коме-

*) В 1968—1972 гг. С. Б. Пиксельнер окончательно доказал, что сжатия глобул окружающим газом из областей H II недостаточно для превращения их в звезды.

тообразными туманностями. Э. А. Дибай предположил, что кометообразные туманности — те же «слоновые хоботы», но освещенные молодой звездой, недавно здесь образовавшейся. Расположение звезды типа Т Тельца в «голове» туманности (подобно ядру в голове кометы) говорит в пользу того, что эта звезда сконденсировалась из туманности.

Итак, если имеется горячая звезда-гигант, способная ионизовать и нагревать газ, то последний своим давлением может сжимать массы холодного газа и пыли до образования «слоновых хоботов», глобул и звезд небольшой массы, примерами которых являются звезды типа Т Тельца. Возможно, этим и объясняется сосуществование Т- и О-ассоциаций. Но как же образуются сами О-звезды?

Очевидно, для получения массивных звезд из газа нужно, чтобы масса газа сжималась под действием либо собственного тяготения, либо магнитного поля. Простой расчет показывал, что для первого механизма необходимы массы облака в десятки тысяч раз больше солнечной. Оставался второй механизм — магнитный. Им в первую очередь и занялись астрофизики.

Газ и магнитное поле

Еще со второй половины 40-х годов, а особенно интенсивно в 50-е годы началось бурное развитие космической электродинамики и магнитной гидродинамики, без которых было бы затруднено дальнейшее развитие теоретической астрофизики. Нужно было объяснить возникновение и изменение магнитных полей на Солнце. Данные наблюдений указывали на существование межзвездных магнитных полей. Вышли на орбиты первые советские искусственные спутники Земли, а затем межпланетные станции, и на стол исследователей легли сведения о геомагнитном поле на больших расстояниях от Земли, а затем и о межпланетных магнитных полях.

Магнитная гидродинамика рассматривает движение заряженной жидкости или ионизованного газа в магнитном поле. Она может иметь не только космические, но и технические применения, хотя исторически все началось именно с космоса. Необходимым условием для применения уравнений магнитной гидродинамики является рассмотрение газа как сплошной среды, без выделения отдельных частиц.

Космическая электродинамика рассматривает движение заряженных частиц и масс проводящего газа (т. е. плазмы) в условиях космоса, как в присутствии, так и в отсутствие магнитного поля. Таким образом, ограничивая свою «сферу деятельности» лишь космосом, космическая электродинамика охватывает гораздо более широкий круг явлений, чем магнитная гидродинамика, хотя полностью использует ее методы и результаты.

Начиная с 1949 г. ученые стали проводить специальные симпозиумы по космической газодинамике (не только электро-, но и газодинамике вообще, включая динамику нейтрального газа). Сперва в Париже, потом в Кембридже (Англия), затем в Кеймбридже (Массачусетс, США). Там собирались и спорили по новым, только что рождавшимся проблемам «киты» космической газодинамики: один из творцов космической электродинамики — шведский астрофизик Х. Альвен, его английский коллега Т. Каулинг, разносторонний астрофизик и космогонист Ф. Хойл, американский специалист по физике плазмы Л. Спитцер и многие, многие другие. Активное участие в этих симпозиумах принимали советские ученые: известный газодинамик Л. И. Седов, астрофизики В. А. Амбарцумян, А. Г. Масевич и особенно С. Б. Пикельнер.

Доктор физико-математических наук С. Б. Пикельнер, пожалуй, более чем кто-либо другой из советских астрофизиков понял значение космической электродинамики для объяснения процессов, происходящих в межзвездной среде, в спиральных рукавах галактик, в глобулах. На симпозиумах он не боялся вступать в острые дискуссии с «китами». С его мнением считались. Одна за другой вышли три его монографии по физике межзвездной среды и космической электродинамике.

Как же было подойти к проблеме происхождения звезд из межзвездного газа? Вот написанный им обзор 1963 года. Там есть все, о чем мы уже знаем: глобулы, «слоновые хоботы», кометообразные туманности, области Н I и Н II. Но четкой картины процесса звездообразования еще не видно.

С. Б. Пикельнер решил начать разработку этой трудной проблемы с другого конца: с изучения спиральных рукавов галактик. Ведь именно в них, как следовало из работ И. И. Проник и других ученых, формируются молодые звезды, именно там концентрируются газовые облака.

Рассмотрение проблемы эволюции галактик и структуры спиральных рукавов с привлечением космической электродинамики привело С. Б. Пикельнера к интересным результатам, о которых мы в свое время расскажем, хотя оно и увело ученого несколько в сторону. Так прошло четыре года.

В начале 1967 г. С. Б. Пикельнер вернулся к изучению состояния межзвездного газа. Процесс формирования звезд из газа во многом зависит от его температуры. А здесь существовало странное противоречие.

Еще в 1939 г. датский астрофизик Бенгт Стремгрен, решая задачу об ионизации межзвездного водорода, доказал необходимость существования резко разграниченных зон ионизованного водорода (H II) и нейтрального водорода (H I). Теория температуры межзвездного газа была в 1948—1950 гг. детально разработана американским астрофизиком Лайманом Спитцером, доказавшим необходимость существования горячих (около 10 000 °К) и холодных (около 20 °К) областей газа. Наблюдения запрещенной спектральной линии ионизованного кислорода в областях H II и радиоизлучения на волне 21 см в областях H I уже в 1951 г. позволили установить, что первые области — горячие (тысячи градусов), а вторые — холодные, но не настолько, как требовала теория Спитцера; их средняя температура составляла 50 °К.

Значит, холодные области H I нагревает еще какой-то источник, не учтенный теорией Спитцера. А ведь он учел, казалось бы, основной процесс — поглощение ультрафиолетового излучения звезд за счет фотоионизации атомов углерода, кремния и железа, которые, хотя и присутствуют в межзвездном газе в ничтожных количествах (например, доля углерода составляет 0,02%, а остальных элементов еще меньше), но благодаря низким потенциалам ионизации способны ионизоваться там, где энергии для ионизации водорода не хватает. Не хватает, ибо водород в областях H I остается нейтральным, не ионизируется. А атомов углерода, кремния и железа так мало, что они просто неспособны нагреть газ выше 20 °К.

С. Б. Пикельнер начал искать новый источник нагрева и нашел его: это были мягкие космические лучи — быстрые заряженные частицы, передающие при столкновении энергию атомам газа. Да, но каким атомам? Космические лучи не будут «выскидывать» редкие атомы углерода, кремния и железа, они обрушатся на основной элемент — водород.

Значит, какая-то доля атомов водорода в областях H I все-таки должна быть ионизована. Но какая?

На помощь пришли радионаблюдения. Уже давно было известно, что при наличии межзвездных магнитных полей будет иметь место эффект Фарадея: поворот плоскости поляризации радиоволн. (Конечно, когда Фарадей обнаружил этот эффект, он понятия не имел о существовании космического радиоизлучения и радиоволн вообще. Он открыл вращение плоскости поляризации света в магнитном поле. Но радиоволны, как и свет, один из видов электромагнитных колебаний, и эффект Фарадея распространяется на все их виды.) В 1962 г. фарадеевское вращение плоскости поляризации межзвездного радиоизлучения действительно было обнаружено. Анализируя связь этого явления с другими эффектами, С. Б. Пикельнер смог установить, что вращение производится внутри спиральных рукавов Галактики, в областях H I. Но раз там есть магнитное поле, значит, должны быть и заряженные частицы: электроны и ионы, ибо только за счет их движений может образоваться магнитное поле. Важную роль для его поддержания играет и электропроводность электронно-ионного газа.

Чтобы создать наблюдаемое вращение плоскости поляризации, в областях H I должна была быть концентрация электронов $0,01—0,03 \text{ см}^{-3}$. Иначе говоря, на куб со стороной 3—5 см приходился ... один электрон. Для сравнения скажем, что концентрация электронов в слое F земной ионосферы в 10^7 раз больше.

Но для С. Б. Пикельнера найденная концентрация электронов была более чем достаточна: ведь она в 100 раз превышала концентрацию атомов углерода, и, значит, объектом ионизации является не углерод, а водород. Первоначальное предположение получило подтверждение. В областях H I водород частично ионизован: примерно от 2 до 10% его атомов потеряли свой единственный электрон и стали ненаблюдаемы.

Впрочем, нет. Остроумие научной мысли и тут позволило наблюдать, казалось бы, принципиально ненаблюдаемый газ — ионизованный водород. Правда, пока ион водорода остается ионом (т. е. протоном без обычно обращающегося вокруг него электрона), его наблюдать нельзя. Но ион может рекомбинировать с электроном, который способен сесть на довольно высокий уровень, например на 105-й, или 153-й, или 208-й. Если после этого электрон

спустится на один-два уровня ниже, атом испустит спектральную линию на радиочастотах. Такая возможность была предсказана еще в 1959 г. молодым советским астрофизиком, ныне доктором наук, Н. С. Кардашевым и подтверждена путем наблюдений пулковскими астрономами З. В. Дравских и А. Ф. Дравских в 1964 г. В дальнейшем этот метод был широко применен для изучения областей III, их температуры и распределения по небу. После 1969 г. его удалось применить и к областям II.

Вскоре после работы С. Б. Пикельнера советский ученый Р. А. Сюняев и американские ученые Дж. Силк и М. Вернер, независимо, указали еще на один источник ионизации водорода в областях II — мягкие рентгеновские лучи, испускаемые некоторыми небесными объектами как в нашей Галактике, так и за ее пределами. Но, в отличие от космических лучей, рентгеновские лучи поглощались межзвездным газом и в плотных облаках были малоэффективны.

Между тем С. Б. Пикельнер продолжал разрабатывать теорию состояния и эволюции межзвездного газа, продвигаясь все дальше и дальше вперед. Он рассчитал зависимость плотности и давления разреженного газа от его температуры, а затем — зависимость давления от плотности. Картина получилась довольно интересная, но в то же время сложная, и вот почему.

В обычном плотном газе давление всегда пропорционально плотности газа и его температуре. Расширяясь, газ всегда охлаждается, а если его сжать — нагревается. Теплообмен в таком газе происходит за счет столкновений молекул, причем каждая молекула за секунду испытывает громадное число столкновений (в комнатном воздухе, например, это число равно $3 \cdot 10^{28}$). В разреженном межзвездном газе передача тепла столкновениями (т. е. теплопроводность) не играет никакой роли и баланс энергии определяется, с одной стороны, нагревом ультрафиолетовым и мягким рентгеновским излучением, а также ударами космических частиц, с другой стороны — потерями энергии на возбуждение нижних уровней ионов углерода, кремния и железа и еще некоторых элементов (для возбуждения даже самых нижних уровней других атомов и ионов энергии уже не хватает). Зависимость этих потерь энергии от температуры, так называемая функция $L(T)$, при низких температурах (ниже 500°K) выглядит почти как прямая пропорциональность, но дальше, от 500 до 5000° , эта

функция почти не растет с температурой. Происходит это потому, что нижние уровни наших трех ионов уже заполнены, а возбудить следующие, расположенные выше, энергии все еще не хватает. Но вот при температурах, превосходящих 5000° , кривая снова резко лезет вверх: включаются новые уровни, на возбуждение которых требуется энергия, а в горячем газе ее уже вполне достаточно (мощное излучение создает горячий водород в линии L_α).

Это поведение кривой энергетических потерь разреженного газа имело неожиданное следствие, крайне важное для теории звездообразования. Если теперь построить зависимость давления того же газа от его плотности, то она будет иметь зигзагообразный вид (рис. 41) и на довольно

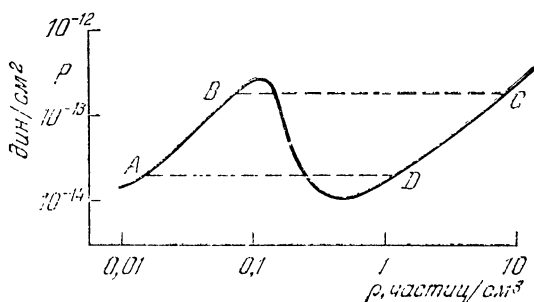


Рис. 41. Зависимость давления разреженного газа от его плотности (по С. Б. Пикельнеру).

широком диапазоне плотности (от 0,01 до 10 частиц на $см^3$) одному значению давления будут соответствовать два а возможных значения плотности (строго говоря, и три, но третье будет неустойчивым). При этом газ малой плотности будет иметь высокую температуру, а более плотный газ — низкую.

Таким образом, просто и естественно удалось объяснить образование облаков межзвездного газа: он сам стремится как бы разделиться на две фазы: плотную (т. е. облака) и разреженную (газ между облаками).

Теория С. Б. Пикельнера позволила объяснить и еще одно непонятное до тех пор явление — поглощение низкочастотного космического радиоизлучения в межзвездном газе. Поглощение это было пропорционально произведению $N_i N_e T^{-3/2}$ (N_i и N_e — числа ионов и электронов в единице объема). Казалось бы, поглощать должны области H II, где велико произведение $N_i N_e$. Но там велика и темпера-

тура T , а значит, $T^{-3/2}$ мало. Поглощение могли обеспечить только очень плотные облака. В модели Пикельнера в облаках $N_e = N_i \approx 0,03 \div 0,05 \text{ см}^{-3}$ и при $T = 50 \text{ }^\circ\text{К}$ даже одно облако дает достаточное поглощение, а поскольку облаков в Млечном Пути много, они практически загораживают там все небо. Таким образом, факт поглощения низкочастотных радиоволн межзвездным газом доказывал наличие в облаках холодных электронов и ионов в достаточном количестве, в соответствии с теорией Пикельнера. Позже количество электронов вдоль луча зрения удалось измерить по запаздыванию импульсов от пульсаров на длинных волнах и получить отсюда среднюю концентрацию электронов (в облаках и в промежутках) $N_e = 0,03 \text{ см}^{-3}$.

Итак, формирование облаков холодного газа было доказано. Но что же происходит дальше? А дальше в игру вступает магнитное поле. При его взаимодействии с гравитационным полем Галактики может возникнуть неустойчивость. Но не простая гравитационная неустойчивость, о которой писал еще Джинс и которую изучали многие космогонисты, а особый вид неустойчивости — неустойчивость Рэлея — Тейлора.

Как часто бывает в науке, явление, открытое в одних условиях, находит себе применение в совершенно других условиях, даже в другой области науки. Когда в 1916 г. Джон Вильям Стрэтт, вошедший в историю науки под именем лорда Рэлея, открыл особый вид неустойчивости жидкости, заключенной между двумя вращающимися цилиндрами, он не подозревал, что его открытие применят полвека спустя для объяснения происхождения звезд.

Суть явления, предсказанного Рэлеем теоретически и подтвержденного Дж. Тейлором в 1923 г. экспериментально, состоит в следующем. Если в несжимаемой жидкости, заключенной между вращающимися цилиндрами, момент количества движения на единицу массы (т. е. произведение скорости на расстояние от оси вращения) растет наружу, то движение будет устойчивым, в противном случае появится неустойчивость: внутренние части жидкости с большим моментом вращения будут стремиться прорваться сквозь наружные слои. Эту классическую форму неустойчивости Рэлея — Тейлора использовали советские космогонисты (например, В. С. Сафронов) для изучения эволюции допланетного облака, из которого сформировались планеты Солнечной системы.

Но есть и другая форма неустойчивости Рэлея — Тейлора, возникающая, например, если тяжелую жидкость налить поверх легкой. Тогда под действием силы тяжести появятся языки плотной жидкости, которые будут стремиться вниз, сквозь легкую жидкость.

Теперь сделаем еще шаг вперед и представим себе такую картину. Пусть мы имеем плазму, находящуюся одновременно в гравитационном и в магнитном поле, причем магнитное поле поддерживает ее против поля тяготения. И здесь тоже разовьется неустойчивость Рэлея — Тейлора.

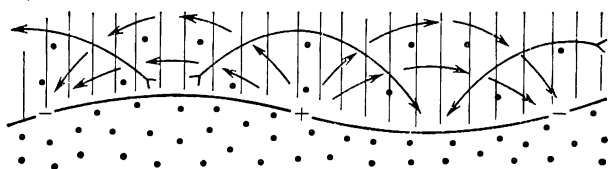


Рис. 42. Неустойчивость Рэлея — Тейлора (заштрихованная область — плазма, точки — магнитное поле, малые стрелки — электрическое поле, большие — движение плазмы, плюсы и минусы — знаки зарядов).

Этот случай рассматривали в своих работах С. Чандрасекар, потом М. Крускал и М. Шварцшильд, еще позднее — Ф. Хойл и Э. Паркер, о нем не раз говорили на симпозиумах, но решающей роли этого явления в процессе звездообразования никто оценить не смог. Это сделал С. Б. Пикельнер, причем совсем недавно — в 1970 г., спустя 15 лет после начала дискуссий о роли этого эффекта в космической газодинамике. Ему удалось связать процесс звездообразования с ударноволновой гипотезой происхождения спиральных рукавов Галактики, о чем будет рассказано в главе IV (стр. 266). Сжатие газа, пересекающего границу спирального рукава, только ускорит действие механизма Рэлея — Тейлора.

Итак (рис. 42), имеется газ, поддерживаемый против поля тяготения Галактики магнитным полем с почти горизонтальными силовыми линиями, а также давлением космических лучей. Поперек силовых линий газ двигаться не может, он может лишь скользить вдоль них. Пусть образовалось газовое облако, более плотное, чем остальной газ. Оно своей тяжестью прогнет силовые линии, образуется своего рода ложбина, куда будет стекать газ со всех сторон, еще больше прогибая ее. Магнитные силовые линии

изогнутся, и в ложбинах образуются более массивные сгущения газа, чем первоначальные облака, — г а з о в ы е к о м п л е к с ы (рис. 43). Газ комплекса как бы подвешен в гамаке из магнитных силовых линий, которые прогибаются под действием поля тяготения Галактики в сторону ее основной плоскости.

В соответствии со сказанным выше плотный газ комплекса должен иметь низкую температуру. Более того, поглощение наружными слоями газа мягких рентгеновских лучей и присутствие межзвездной пыли, ослабляющей поток ультрафиолетового излучения, способствуют еще

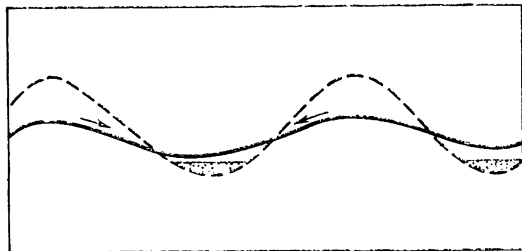


Рис. 43. Образование комплексов (по С. Б. Пикельперу).

большему охлаждению центральных частей комплекса: до 5—6 °К. Исследование радиолний межзвездного гидроксила OH подтвердило, что такие температуры действительно встречаются.

При температуре 6 °К плотность газа в комплексе достигает уже 2000 атомов в 1 см^3 . Впрочем, не атомов, а молекул, ибо водород в этих условиях переходит в молекулярную форму. Когда толщина холодного слоя в комплексе достигнет 0,5 светового года, начнет сказываться его собственное поле тяготения, привлекая окружающий газ и пыль. Комплекс будет расти. И вот тут уже заработает механизм гравитационной неустойчивости, комплекс начнет распадаться на отдельные сгустки.

Какова будет масса этих сгустков? Ее нетрудно подсчитать, зная массу молекулы водорода $m = 3,2 \cdot 10^{-24} \text{ г}$, число молекул в единице объема комплекса N и взяв куб со стороны, равной толщине комплекса $2H$. Искомая масса будет равна

$$M = mN (2H)^3.$$

Но теория строения сгустков разреженного газа в собственном поле тяготения, развитая в 1965 г. английским астрофизиком Л. Местелом, указывала, что в таком газе N обратно пропорционально температуре T , а H прямо пропорционально T . Для комплексов, рассмотренных С. Б. Пикельнером, $N = 2,4 \cdot 10^{14} T^{-1} \text{ см}^{-3}$, $H = 6 \cdot 10^{16} T \text{ см}$. Тогда из формулы получается $M = 7 \cdot 10^{31} T^2 \text{ г}$, т. е. масса сгустков пропорциональна квадрату температуры.

Это был очень важный результат, полученный С. Б. Пикельнером. Попробуем «построить» звезды при температуре 6°К . Получим $M = 2,5 \cdot 10^{33} \text{ г}$, т. е. чуть больше массы Солнца! А теперь возьмем газ потеплее, ну, скажем, при $T = 50^\circ \text{К}$. Из той же формулы найдем $M = 1,75 \cdot 10^{35} \text{ г}$, т. е. около 85 масс Солнца. Это — предел. Более массивных звезд мы не знаем, и теперь понятно, почему. Для их образования нужна температура газа выше 50°К , а она соответствует очень низким плотностям газа в комплексах. Кроме того, большие массы очень неустойчивы, скорее распадаются на более мелкие фрагменты.

Как же выглядит процесс формирования звезд по теории С. Б. Пикельнера? Сначала, при низких температурах, образуются звезды малой массы. Одновременно идет еще один процесс, регулирующий температуру газа: атомы углерода (ответственные, как мы помним, за охлаждение газа) начинают прилипать к пылинкам; число свободных атомов углерода убывает, охлаждение газа уменьшается, температура растет, а вместе с ней растут массы формирующихся звезд. Когда количество свободного углерода уменьшается раз в десять, температура газа в комплексе достигает $40\text{—}50^\circ \text{К}$ и начинают формироваться самые массивные звезды класса O . Но вот в них начинаются термоядерные реакции, O -звезды начинают излучать. Их мощное излучение ионизует окружающий газ, и звездообразование прекращается.

Так образуются звездные ассоциации, в том числе O - и T -ассоциации. Вторые в начале, первые — в конце процесса звездообразования. Что же происходит потом?

Образовавшиеся звезды не сразу будут стремиться «упасть» на главную плоскость Галактики. Хотя магнитное поле их уже не удерживает, остается еще притяжение окружающего газа. Лишь когда общая масса образовавшихся звезд станет сравнима с массой газа, они начнут движение к галактической плоскости. Но это предположение нуждалось в проверке. По просьбе С. Б. Пикельнера

сотрудница Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Н. М. Артюхина определила характер движений нескольких групп звезд типа Т Тельца и О-звезд. У всех этих звезд скорости были либо направлены к плоскости Галактики, либо равнялись нулю, т. е. звезды «висели» над этой плоскостью, как бы не решаясь начать движение.

Как видим, С. Б. Пикельнеру удалось объяснить много неясных прежде вопросов, нарисовать в деталях механизм звездообразования, все время опираясь на данные наблюдений. Но проблему еще нельзя было считать решенной. На ряд вопросов (например, образование шаровых звездных скоплений) теория Пикельнера не давала ответа. А кроме того, ведь были и другие подходы к решению проблемы.

Существуют ли Д-тела?

Да, имелась, как мы знаем, и иная точка зрения на вопрос об исходном материале, из которого формируются звезды. Она принадлежала В. А. Амбарцумяну и была им впервые высказана еще в 1947 г.

Вот что он говорил об этом в своем докладе на Втором совещании по вопросам космогонии в мае 1952 г.:

«Каждая тесная группа звезд (скопление, цепочка, кратная система типа Трапеции) должна возникать в ассоциации из одного тела дозвездной природы. Эти предполагаемые тела можно называть протозвездами. Протозвезды должны быть объектами низкой светимости (в видимых и фотографических лучах)».

Но что еще можно было сказать о протозвездах? В. А. Амбарцумян указывал, что «мы еще не имеем данных о том, что представляют собой протозвезды. Можно сделать много различных предположений о природе протозвезд (глобулы, диффузные туманности, сверхплотные звезды и др.). В связи с этим могут быть разработаны многочисленные варианты гипотез о механизме возникновения звездных групп. Подробная разработка этих вариантов является задачей будущего».

Более определенно звучало высказывание В. А. Амбарцумяна в его статье в «Сообщениях Бюраканской обсерватории»: «Тела, из которых формируются в ассоциациях звезды, не являются ни звездами, ни диффузными туманностями. Можно с уверенностью утверждать, что это тела нового, неизвестного нам типа — новая форма материи, ее дозвезд-

ная стадия». Отвечая на вопрос одного из участников Второго совещания по вопросам космогонии, В. А. Амбарцумян высказал еще одну мысль: «Если дозвездные тела являются дискретными объектами, мы должны предположить, что и они не могли существовать бесконечно долго и возникли либо из диффузного вещества, либо из более крупного дозвездного тела».

Итак, была предложена гипотеза образования звезд из каких-то неизвестных дозвездных тел, или Д-тел, как их потом стали называть. В своих дальнейших высказываниях В. А. Амбарцумян все более склонялся к тому, что Д-тела имеют высокую плотность, порядка ядерной. Подтверждение этого взгляда он пытался искать в некоторых особенностях звезд типа Т Тельца и вспыхивающих звезд типа UV Кита, полагая, что вспышки и нерегулярные изменения блеска этих звезд связаны с освобождением каких-то запасов энергии, отличной по своей природе от термоядерной. Но это уже была «гипотеза на гипотезе», а ведь надо было еще обосновать основную гипотезу о Д-телах.

Задача была поставлена трудная. В. А. Амбарцумян продвигался мелкими шагами, буквально ощупью. Д-тела должны иметь малые размеры, большую массу и громадную плотность. Как же все-таки их обнаружить? Явления в звездах типа Т Тельца и UV Кита — лишь намек, но отнюдь не доказательство того, что в них происходит освобождение «дозвездной энергии». Крабовидная туманность? Может быть, она тоже остаток протозвезды? А явление вспышки сверхновых, возможно, сопровождается образованием туманностей из протозвезд?

В поисках Д-тел В. А. Амбарцумян обратился к ядрам галактик. Ядро галактики в Андромеде — маленькое, резкое, размерами не более 12—15 световых лет. Быть может, здесь мы имеем дело с Д-телом, находящимся внутри этого ядра? Или вот галактика NGC 4486 в созвездии Девы, из ядра которой исходит резкий радиальный выброс — что там произошло?

Поиски загадочных Д-тел заставили В. А. Амбарцумяна вплотную заняться изучением ядер галактик, и здесь им и его сотрудниками были сделаны открытия первостепенной важности. Но Д-тела упорно ускользали от попыток обнаружить какие-либо реальные их проявления.

Тогда В. А. Амбарцумян пошел по другому пути. В 1960 г. совместно с физиком Г. С. Саакяном он рассмотрел теоретически сверхплотные звездные конфигурации. Отталки-

ваясь от классических работ Ландау, Оппенгеймера и Волкова, Амбарцумян и Саакян проанализировали изменения состояния вещества (холодного вырожденного газа) с повышением плотности (с переходом к более глубоким слоям звезды плотность должна расти).

Вот к каким выводам привел этот анализ Амбарцумяна и Саакяна. При плотностях порядка 10^7 г/см^3 газ состоит из атомных ядер и электронов. Таковы, как известно, плотности типичных белых карликов.

При плотности, большей $2,5 \cdot 10^{11} \text{ г/см}^3$, появляются первые нейтроны, а при плотностях, превышающих 10^{13} г/см^3 , мы имеем дело практически с нейтронным газом.

При значительно более высоких плотностях (около 10^{15} г/см^3) появляются первые гипероны. Сначала образуются сигма-гипероны, при вдвое большей плотности — лямбда-гипероны, потом кси-гипероны (см. стр. 92). При плотностях свыше 10^{16} г/см^3 гипероны преобладают над другими видами частиц.

Таким образом, первоначальное представление о сверхплотных звездах как о чисто нейтронных нужно было заменить представлением о многослойных конфигурациях с гиперонным ядром, нейтронным слоем вокруг него и ядерно-электронной оболочкой. В гиперонном ядре сосредоточена основная часть массы звезды.

Так как протоны, нейтроны и гипероны носят общее название **баронов** (что означает буквально «тяжелые частицы»), Г. С. Саакян предложил заменить название «нейтронные звезды» более общим названием «барионные звезды».

Продолжая разрабатывать проблему строения барионных звезд, Г. С. Саакян и его сотрудники пришли к единственному правильному выводу о том, что эти тела не могут иметь массу, существенно превышающую массу Солнца, иначе они неизбежно должны сколлапсировать, уйти под свой гравитационный радиус, под сферу Шварцшильда.

Мы уже знаем, что именно таков конец пути массивных звезд. Это — «черные дыры». Но в космогонической концепции В. А. Амбарцумяна сверхплотные конфигурации не конец, а начало эволюции, и массы их должны быть намного больше массы Солнца. Могут ли устойчиво существовать такие тела? Исследование этого вопроса, предпринятое Г. С. Саакяном и Ю. Л. Вартамяном, заставило их в 1968 г. признать, что вряд ли удастся найти подкрепляющее теоретическое обоснование концепции

В. А. Амбарцумяна, оставаясь в рамках теории тяготения Ньютона — Эйнштейна.

Одним из качеств В. А. Амбарцумяна как исследователя является его стремление никогда не ограничивать себя рамками привычных физических теорий. Ведь буквально на его глазах развилась и завоевала всеобщее признание квантовая механика, а немногим раньше — общая теория относительности. Эти новые теории не отвергали, а лишь обобщали старые классические представления: одна — на явления

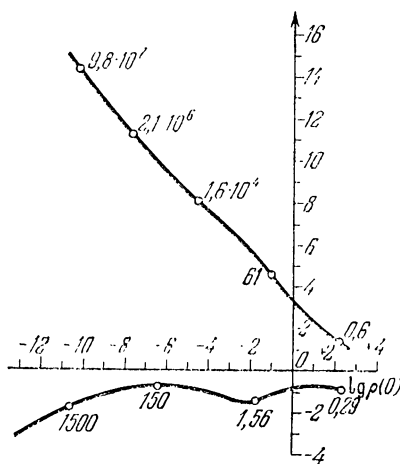


Рис. 44. Массы устойчивых сверхплотных конфигураций (по Г. С. Саакяну и М. А. Мнацакяню).

микромира, другая — на движения со скоростями, близкими к скорости света.

И Амбарцумян отнюдь не собирался опровергать существующие физические теории, как это пытаются делать и до сих пор некоторые дилетанты, возмнившие себя гениями. Но он допускал возможность дальнейшего обобщения этих теорий, например, на случай огромных масс или плотностей.

Одно из таких обобщений попытался предложить еще в 1937 г. один из создателей квантовой механики П. Дирак. Оно со-

стояло в том, что постоянная тяготения предполагалась не строго постоянной, а медленно убывающей со временем. Этим Дирак, а затем П. Йордан пытались объяснить «расширение Вселенной». Не будем останавливаться на всех аспектах этой сложной проблемы: это увело бы нас слишком далеко. Основным недостатком теории Дирака — Йордана является то, что, в отличие от теории относительности и квантовой механики, она не предсказала пока ни одного нового явления в физике и астрономии, которое могло бы служить ее решительным подтверждением.

Но испытать новую теорию стоило. И вот в 1969 г. Г. С. Саакян и М. А. Мнацакян применили ее для расчета сверхплотных звездных конфигураций и получили любопытный результат: для каждого значения средней плотно-

сти тела есть не одно, а два устойчивых решения (рис. 44). Одно из них (нижняя ветвь на рис. 44) соответствует белым карликам и нейтронным звездам, а другое (верхняя ветвь) — массивным телам со сколь угодно большими массами. Но... радиусы этих тел, тоже очень большие, все же оказываются меньше их гравитационного радиуса. Таким образом, обобщенная теория гравитации приводит к гигантским «черным дырам», которые излучать, увы, не могут, но могут притягивать другие небесные тела.

Вы довольны, читатель? (Автор по опыту знает, что читатель всегда в таких случаях бывает доволен.) Но ведь обобщенная теория тяготения пока не подтверждена ни опытами, ни наблюдениями. «Черные супердыры» никем еще не обнаружены. «Ничего, подтвердят, обнаружат», — слышу я возражение читателя-оптимиста. Ну, что же, подождем — наука идет вперед. От ближайших десятилетий можно ожидать не меньше, а гораздо больше, чем дали десятилетия прошедшие.

А теперь двинемся дальше — из прекрасного мира звезд к еще более интересному миру галактик. Ибо именно в галактиках рождаются, живут и умирают звезды.

ГИПОТЕЗЫ ОБ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК

Звездные острова или туманности?

Как это ни странно, но история внегалактической астрономии начинается с ловли комет. В 1781 г. известный ловец комет, астроном Парижской обсерватории Шарль Мессье решил составить каталог туманностей, чтобы впредь не принимать их за кометы. К тому времени на его «личном счету» уже было 8 вновь открытых комет, вообще же за свою долгую жизнь он наблюдал 36 комет. В каталог Мессье вошло 103 объекта, которые и сейчас принято обозначать номерами его каталога с прибавлением буквы М. Так, М 1 — это уже известная нам Крабовидная туманность, М 42 — туманность Ориона и т. д.

Но в каталоге Мессье наряду с «настоящими» туманностями (Крабовидная, в Орионе и др.) оказались и тесные звездные скопления. Так, М 45 — это Плеяды, М 44 — Ясли, М 13 — шаровое звездное скопление в Геркулесе. Всего в каталоге Мессье оказалось 20 рассеянных и 24 шаровых звездных скопления.

Была в каталоге Мессье и еще одна крупная группа объектов, которые не были ни туманностями, ни звездными скоплениями. К ним принадлежали туманности в Андромеде (М 31), Треугольнике (М 33), Гончих Псах (М 51) и еще 22 объекта. Это были галактики, далекие звездные системы, подобные нашему Млечному Пути.

Но во времена Мессье об этом никто даже не догадывался и самого термина «галактика» не существовало.

Туманными пятнами вскоре заинтересовался другой астроном — Вильям Гершель, ганноверец, переселившийся в Англию. В отличие от Мессье, Гершель рассматривал эти объекты не как источник путаницы при наблюдениях комет, а как небесные тела, подлежащие пристальному изучению. В 1783 г. он начал систематические наблюдения туманных пятен со своим самодельным рефлектором, имевшим диа-

метр зеркала 30 см. Через год Гершель построил 47-сантиметровый (20-футовый) рефлектор и большую часть наблюдений проводил с ним, а после 1787 г. применял иногда 40-футовый рефлектор с действующим отверстием 122 см*).

Наблюдая туманности и звездные скопления, Гершель составил несколько их каталогов, в которые вошло 2500 объектов. Его сын и продолжатель его работ Джон Гершель, перенеся пункт наблюдений на мыс Доброй Надежды, составил каталог 1700 туманностей южного неба, а затем, в 1864 г., опубликовал сводный «Генеральный каталог» (GC), включив в него 5079 объектов.

Вильям Гершель еще в начале своих наблюдений заметил, что часть «туманных пятен» разлагается на звезды, а другая часть — нет. Но тогда он полагал, что просто это более далекие звездные скопления и для того, чтобы разложить их на звезды, нужны телескопы большей силы.

Однако в 1791 г. под влиянием наблюдений новых объектов, не вписывавшихся в эту схему, Гершель пришел к выводу, что помимо звездных скоплений должны существовать «истинные» туманности незвездной природы, состоящие из некоего «флюида», т. е. протяженной сплошной среды или диффузной материи (в нашем понимании — из газа). Эта материя обладает свойством самосвечения.

Гершель одним из первых понял, что Млечный Путь представляет собой гигантскую звездную систему, «островную вселенную». Применяв метод «черпков», т. е. подсчетов числа звезд различной звездной величины в отдельных избранных участках, он попробовал представить себе строение нашей Галактики. Вместе с тем он правильно полагал, что существуют и другие «островные вселенные», похожие на Млечный Путь, и что все вместе они образуют некую гигантскую сверхсистему. Но четких признаков, которые позволили бы отличать «островные вселенные» от «истинных» туманностей и звездных скоплений, входящих в состав нашей Галактики, в распоряжении Гершеля не было и быть не могло. Они появились позже, уже в 60-е годы XIX в.

* Телескопы Гершеля по традиции обозначают фокусным расстоянием, выраженным в футах (1 фут = 30,5 см). Диаметр их зеркал мы приводим в сантиметрах. Однако надо помнить, что из-за низкой отражательной способности металлических зеркал того времени телескопы Гершеля намного уступали современным телескопам тех же размеров.

В 1864 г. английский астроном У. Хёггинс обнаружил, что часть туманностей имеет резко выраженные яркие эмиссионные линии, другие же — обычные спектры поглощения, напоминавшие спектры звезд. Это можно было объяснить следующим образом:

а) туманности с эмиссионными линиями состоят из газа,
б) туманности с непрерывным спектром — далекие звездные системы или

в) туманности с непрерывным спектром — облака пыли, отражающие свет ближайших звезд.

Итак, если в отношении эмиссионных туманностей вопрос об их природе решался однозначно, то в отношении туманностей с непрерывным спектром существовали два возможных объяснения. Между ними нужно было сделать выбор.

Часть туманностей, имевших форму кольца или диска с яркой звездой в центре (рис. 34), получила название планетарных (поскольку они напоминали диск планеты). Все они имели эмиссионный спектр. Такой же спектр имели неправильные диффузные туманности типа туманности Ориона или Крабовидной.

Но был еще довольно многочисленный класс спиральных туманностей, открытых в 1845 г. лордом Россом (В. Парсонсом) с помощью 48-футового (180-сантиметрового) рефлектора, наибольшего из телескопов с металлическими зеркалами. Спиральные туманности имели непрерывный спектр. Такой же спектр имели эллиптические туманности. В. Гершелю и другим астрономам, наблюдавшим их визуально, эти туманности казались белыми, а «истинные» туманности — зелеными, поскольку в их свечении преобладали яркие зеленые линии, которые сперва приписывали неизвестному элементу небулию (от латинского слова «nebula» — туманность). Лишь в 1927 г. американский астроном И. Боуэн доказал, что линии мнимого небулия принадлежат атомам кислорода и азота, находящимся в особом, метастабильном состоянии, когда в атоме совершаются запрещенные переходы (не осуществляющиеся в обычном состоянии). Такие переходы возможны только в сильно разреженном газе, когда столкновения атомов между собой (причина «запрета» этих переходов) крайне редки. Излучаемые при переходах из метастабильных состояний спектральные линии тоже называются запрещенными. Таким образом, «зеленые» туманности состояли из очень разреженного газа.

В. Гершель первый обратил внимание на то, что «белые» туманности находятся преимущественно вдали от Млечного Пути, а «зеленые» — в его плоскости. Это обстоятельство явилось одним из важнейших для решения вопроса о природе «белых» туманностей.

Но до окончательного решения этого вопроса было еще далеко. Необходимо было тщательно изучить формы и структуру загадочных туманностей. Визуальные наблюдения здесь не годились. И вот, начиная с 1885 г., астрономы Инской обсерватории (США) занялись систематическим фотографированием спиральных и эллиптических туманностей. Эта работа продолжалась несколько десятилетий.

Между тем в 1888 г. английский астроном Дж. Дрейер составил «Новый общий каталог» (New General Catalogue — NGC), включавший 7840 туманностей, звездных скоплений и галактик (как и в его предшественнике, «Генеральном каталоге» Дж. Гершеля, эти три вида объектов были собраны вместе). В 1895 г. Дрейер издал дополнение к нему под названием Index Catalogue (IC), а в 1908 г. — второе дополнение под тем же названием. Вместе с дополнениями каталог Дрейера содержит 13 200 объектов. Все они и до сих пор обозначаются номерами по этому каталогу с приращением впереди букв NGC или IC. Этими обозначениями будем пользоваться и мы.

«Великий спор»

Как мы уже рассказывали во II главе, открытие зависимости «период — светимость» у цефеид в 1912—1913 гг. позволило определить масштабы нашего Млечного Пути, расстояния и размеры шаровых звездных скоплений и, наконец, расстояние до Магеллановых Облаков — двух хорошо заметных невооруженным глазом туманных пятен, находящихся в южном полушарии неба (рис. 45). Но Магеллановы Облака давно уже были разрешены на звезды, и именно в Малом Магеллановом Облаке находились те 7 цефеид, по которым мисс Ливитт впервые вывела зависимость «период — светимость» (см. стр. 98—99). В 1916—1918 гг. Х. Шепли с помощью этой зависимости, уточнив ее нуль-пункт, определил, что расстояние до Магеллановых Облаков составляет около 100 000 световых лет. Это означало, что Магеллановы Облака находятся за пределами нашей Галактики, поскольку ее размеры оценивались, например, Г. Зеелигером в 23 000 световых лет.

В те годы, однако, не было полной ясности в этом вопросе. Зеелигер получил свою оценку размеров Галактики по методу, близкому к методу «черпков», применявшемуся еще В. Гершелем, а именно путем подсчетов числа звезд до данной звездной величины в сочетании с определением их собственных движений. Если считать, что в среднем скорости у всех звезд одинаковы и не зависят от расстояния до них, то по величине угловых собственных движений звезд можно определить их расстояние.

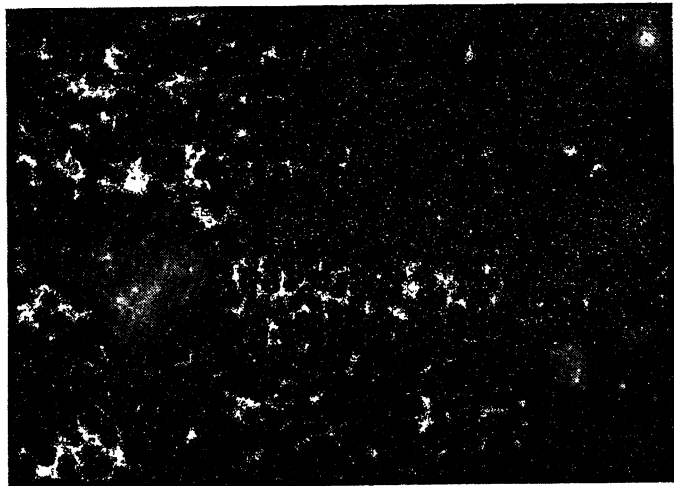


Рис. 45. Магеллановы Облака. Вверху справа α Эридана — Ахернар.

Х. Шепли дал совсем другую оценку размеров Галактики: 300 000 световых лет. Он считал, что шаровые звездные скопления находятся внутри нашей Галактики, а расстояния до них, определенные по цефеидам и по звездным величинам самых ярких звезд скопления, достигали 220 000 световых лет.

Против оценок этих расстояний выступил астроном Ликской обсерватории Х. Кертис. Он считал, что все расстояния завышены Шепли раз в десять. Кертис поддерживал оценку размеров Галактики, вытекавшую из звездных подсчетов, и считал, что шаровые звездные скопления гораздо ближе к нам, чем находит Шепли.

Поскольку вопрос о масштабах Галактики и окружающей ее части Вселенной представлял громадный интерес, Национальная академия наук США в Вашингтоне организовала 26 апреля 1920 г. специальную дискуссию между Шепли и Кертисом, получившую название «великого спора». Этот спор касался не только масштабов Галактики, но и природы спиральных туманностей, о чем мы расскажем дальше. И разным оказался итог дискуссии по этим двум проблемам.

Оба участника спора соглашались в том, что: а) звезды в скоплениях и в отдаленных частях Млечного Пути ничем особенным не отличаются от звезд в окрестностях Солнца (в этом они были правы); б) относительные расстояния в шаровых скоплениях, определенные Шепли, правильны (и это было верно); в) межзвездного поглощения света не существует (а вот это было серьезной ошибкой).

Шепли опирался на данные по цефеидам и ярким гигантам. Кертис критиковал эти данные и считал, что красные и желтые звезды в скоплениях — карлики, схожие с Солнцем (тогда как на самом деле это были гиганты).

Не будем подробно описывать все детали «великого спора», приведем только характерные для оценки позиции его участников данные для расстояния до шарового звездного скопления М 13 в Геркулесе (в световых годах):

| | |
|-----------------------------|--------|
| по Шепли | 36 000 |
| по Кертису (первоначальное) | 3 600 |
| по Кертису (пересмотренное) | 8 000 |
| по современным данным | 25 000 |

Итак, мы видим, что здесь Шепли оказался ближе к истине, чем Кертис. Некоторое завышение его оценки связано с пренебрежением межзвездным поглощением света, из-за которого все далекие звезды казались слабее (а потому относились Шепли на более далекие расстояния).

Но в другом вопросе именно Кертис был прав, а Шепли ошибался. Это был вопрос о природе спиральных туманностей. Кертис считал, что это «островные вселенные», подобные нашей Галактике, тогда как Шепли полагал, что это «истинно туманные объекты».

Первые попытки определить расстояние до самой яркой и, очевидно, ближайшей из них — туманности Андромеды (рис. 46) — давали странные и противоречивые результаты.

Шведский астроном К. Болин в 1907 г. определил из большой серии измерений параллакс туманности Андромеды и получил значение $0",17$, чему соответствовало расстояние...

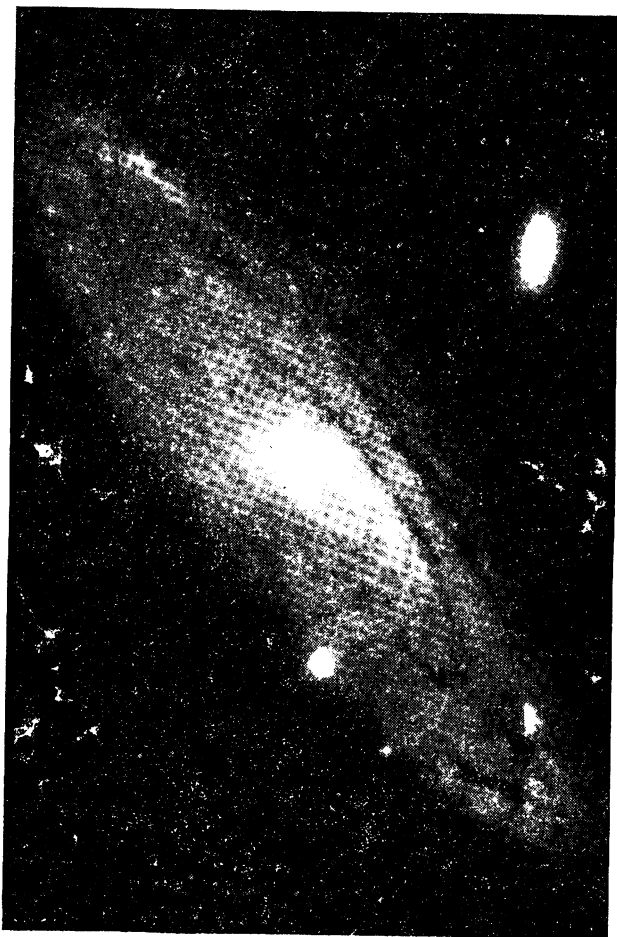


Рис. 46. Галактика М 31 (туманность Андромеды).

в 19 световых лет. Выходило, что эта туманность — совсем рядом! Но спустя четыре года американский физик Ф. Верн сделал оценку расстояния, сравнив блеск Новой

Андромеды, вспыхнувшей в 1885 г. (см. стр. 138), и Новой Персея, и получил 1600 световых лет. Туманность, по Вери, была не близко, но все же в пределах Млечного Пути. Вери не знал, что S Андромеды была сверхновой, тогда как звезда в Персее — обычной новой. Лишь в 1917 г. сотрудник обсерватории Маунт Вилсон Дж. Ричи обнаружил несколько обычных новых в туманности Андромеды и в ряде других спиральных туманностей. Этим заинтересовался Кертис, вскоре также нашедший несколько новых в спиралах по пластинкам Ликской обсерватории. В 1918 г. он определил по четырем новым расстояние до туманности Андромеды в 500 000 световых лет. Это означало, что она (значит, и все другие спиральные туманности) — внегалактический объект.

Между тем Шепли подошел к этому вопросу еще с другой точки зрения. По его оценкам, протяженность Млечного Пути составляла 300 000 световых лет. Если считать, что туманность Андромеды такого же размера, то по ее угловым размерам получалось, что расстояние до нее 10 миллионов световых лет. А тогда нужно было допустить, что новые в M 31 гораздо ярче новых нашей Галактики.

Если же яркость новых в M 31 и в Млечном Пути была одного порядка, то приходилось допустить, что галактика в Андромеде в 20 раз меньше Млечного Пути (примерно то же было и в отношении других галактик). Возникла гипотеза, что Млечный Путь — своего рода «материк», а другие галактики — «острова».

Для критики гипотезы «островных вселенных» ее противники использовали еще один наблюдательный факт. Спиральные туманности упорно избегали пояса вдоль главной плоскости Млечного Пути, и их количество росло по мере приближения к галактическим полюсам. Если спиральные туманности — внегалактические объекты, то почему их система связана со структурой Млечного Пути? Число, что эти туманности входят в состав Млечного Пути и по какой-то пока еще неизвестной причине концентрируются к его полюсам.

Шепли допускал, что спиральные туманности могут не принадлежать к нашей Галактике, быть ее соседями. Млечный Путь, по его мнению, в своем движении в пространстве так бы «расталкивает» спиральные туманности в стороны от своей центральной плоскости. Но тогда оставалось непонятным, почему «расталкиваются» туманности со

всех сторон, а не только с той, где Млечный Путь уже прошел.

Правильное объяснение этого явления дал Кертис. У многих туманностей, наблюдаемых с ребра, экватор пересечен темной полосой поглощающей материи. Пояс такой материи должен иметься и у Млечного Пути. Он-то и закрывает от нас далекие туманности, лежащие в галактической плоскости. Теперь мы знаем, что это было единственно правильное объяснение.

Точку зрения Кертиса поддержали А. Эддингтон и шведский астроном К. Лундмарк. А в 1930 г. швейцарец Р. Трюмплер, долго работавший на Ликской обсерватории, изучая рассеянные звездные скопления, доказал существование общего поглощения света в Галактике. Оценка размеров Галактики была уменьшена до 100 000 световых лет. С другой стороны, пересмотр нуля-пункта зависимости «период — светимость» для цефеид, произведенный в 1929 г. Э. Хабблом, позволил «отодвинуть» галактику в Андромеде почти вдвое — до 900 000 световых лет. Это расстояние находилось в хорошем согласии с оценкой по максимальному блеску новых. Кроме того, Хабблу удалось разрешить внешние части ближайших спиральных туманностей на звезды. Но их ядра, а также эллиптические туманности оставались неразрешенными до 1944 г., когда В. Бааде на обсерватории Маунт Вилсон сумел разложить на звезды ряд эллиптических галактик и центральную часть галактики в Андромеде. Новый пересмотр нуля-пункта зависимости «период — светимость», основанный на фотографиях М 31, полученных с 5-метровым рефлектором обсерватории Маунт Паломар, сделал в 1952 г. В. Бааде. Это привело к удвоению всех межгалактических расстояний, в том числе и до М 31. А так как на паломарских снимках вышли и самые внешние части М 31, ее размеры оказались даже несколько больше, чем у нашей Галактики. Светимости шаровых звездных скоплений в обеих галактиках оказались одинаковыми. Таким образом, все «преимущества» Млечного Пути были ликвидированы.

«Великий спор» был разрешен. Но спиральные и эллиптические галактики еще долго продолжали называть внегалактическими туманностями, в отличие от «истинных», диффузных туманностей, которые назывались галактическими. И только в 50-х годах этот термин был окончательно вытеснен из астрономической литературы правильным термином г а л а к т и к и.

Классификация Хаббла

Эдвин Хаббл не ограничился тем, что с помощью цефеид определил расстояния до галактик и тем самым решил вопрос об их природе, положив конец «великому спору». В 1925 г. он предложил первую подробную морфологическую классификацию галактик.

Уже давно было ясно, что галактики (или внегалактические туманности, как их называли раньше) можно разбить на три основных типа: спиральные (S), эллиптические (E) и неправильные (I). Примером неправильных галактик являются Магеллановы Облака.

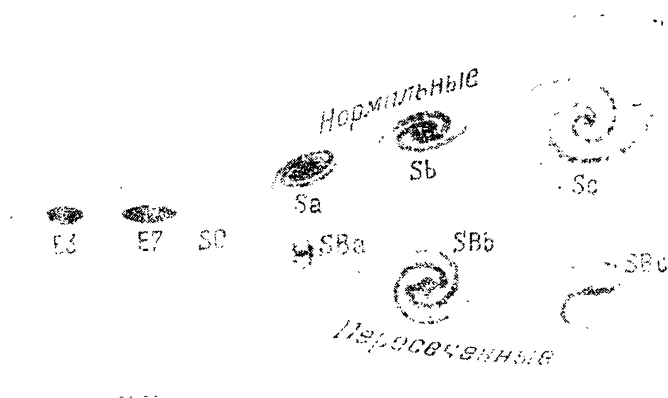


Рис. 47. Классификация галактик по Э. Хабблу.

В своей классификации Хаббл как бы оставляет неправильные галактики в стороне и строит последовательность форм эллиптических и спиральных галактик. Вот как она выглядит (рис. 47).

Ряд эллиптических галактик начинается с класса E0 — галактик сферической формы, без заметного сжатия. Галактики, имеющие сжатие, относят к классам E1 — E7. Цифра при букве E берется не произвольно, а по округленному отношению $10(a - b) : a$, где a и b — большая и малая полуоси эллипсоида. У галактик E1 $b = 0,9a$, у E3 $b = 0,7a$, наконец, у E7 $b = 0,3a$. Галактик с более сильным сжатием Хаббл не обнаружил.

Спиральные галактики делятся на два подтипа: нормальные (S) и пересеченные (SB). У первых спирали отходят

прямо от ядра, у вторых ядро пересечено перегородкой (баром), от которой уже отходят спирали. В каждом из подтипов Хаббл выделил три класса: а, в и с, отличающиеся прогрессирующим уменьшением относительной

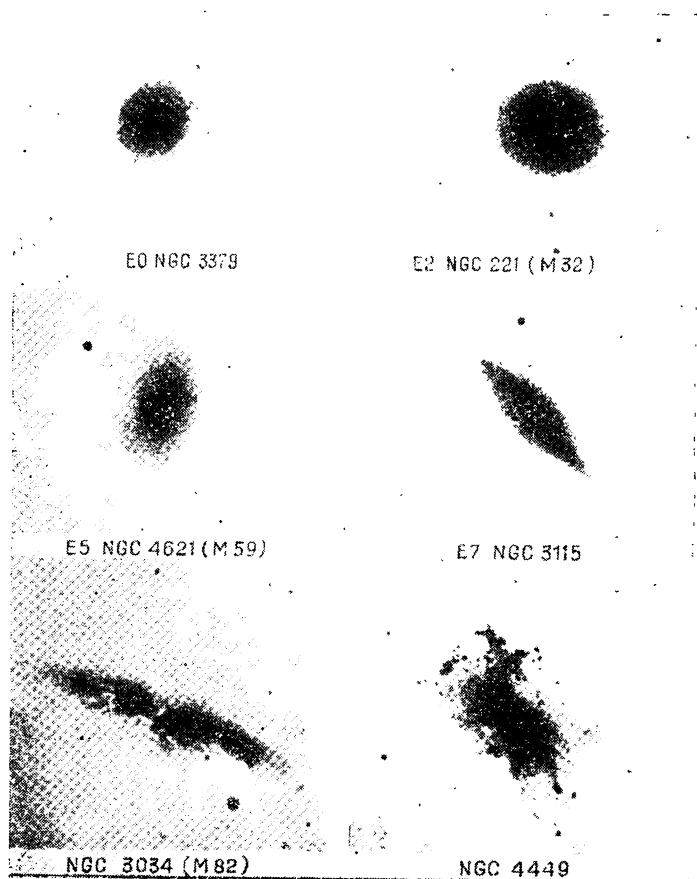


Рис. 48. Типы эллиптических галактик (по Хабблу). Две нижних галактики принадлежат к числу неправильных.

яркости и размеров ядра по сравнению со спиральными ветвями и одновременно увеличением степени раскрытия ветвей, их клочковатости и структурности. Позже Хаббл добавил еще один класс S0, похожий на аморфные галактики

типа E, но содержащий кроме большого, резкого ядра еще и плоский диск без следов спиральных ветвей. Этот класс является как бы переходным от E7 к Sa и SBa.

Известная галактика в Андромеде (M 31) принадлежит к классу Sb, галактики в Треугольнике (M 33) и в Гончих

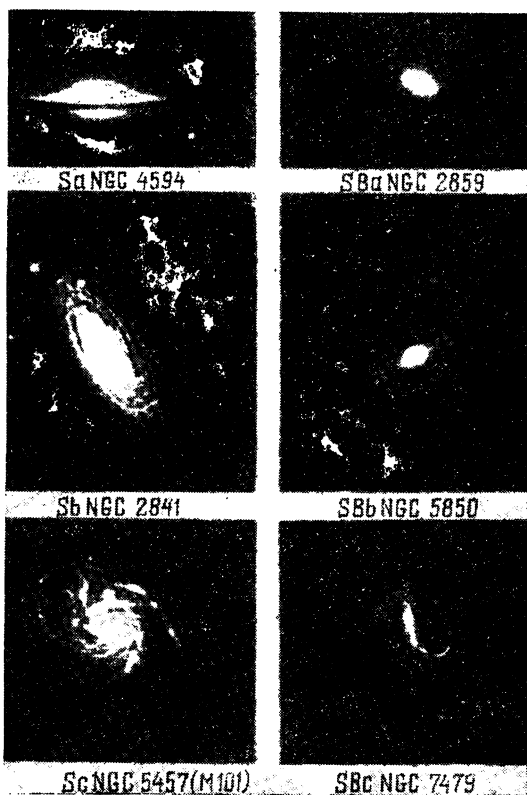


Рис. 49. Типы спиральных галактик (по Хабблу).

Псах (M 51) — к классу Sc. Спутник галактики в Андромеде, карликовая галактика M 32, — эллиптическая, класса E2. На рис. 48 и 49 показаны некоторые типичные галактики с их обозначениями по классификации Хаббла.

Несмотря на то, что классы галактик на схеме Хаббла были соединены линиями, как бы указывавшими на некото-

рую последовательность состояний, Хаббл избегал трактовать эту последовательность как эволюционный ряд, как путь развития, эволюции галактик. Впоследствии и сам Хаббл и многие другие астрономы, используя все возрастающий наблюдательный материал, уточняли, совершенствовали или видоизменяли его классификацию. Но свое значение она сохранила и до сих пор. А эволюционный смысл ей попытались придать другие ученые. И первым среди них был наш старый знакомый — Джемс Джинс.

Гравитация, неустойчивость, сжатие

Мы уже рассказывали в III главе (стр. 174) о том, как Джинс в серии работ 1916—1919 гг. рассмотрел проблему образования сгущений из массы однородного разреженного газа. В основе его теории лежала идея, согласно которой эта масса неустойчива, ибо любое возмущение достаточно больших размеров может привести к образованию сгущений, которые будут иметь тенденцию к дальнейшему росту за счет гравитационных сил. Эта идея получила математическое воплощение в принципе гравитационной неустойчивости, о котором мы также рассказывали.

Джинс принимал начальную плотность равномерно распределенной массы газа, эдакого «первичного хаоса», в 10^{-30} г/см³. Эта оценка, заметим тут же, недалеко от современных оценок средней плотности Метагалактики, хотя, как мы увидим в главе V, вопрос о том, превышает ли эта плотность величину 10^{-29} г/см³ или же нет, имеет кардинальное значение для выяснения судеб окружающей нас части Вселенной.

Прежде чем двинуться дальше, представим себе, что это за плотность 10^{-30} г/см³. При такой плотности один атом отделяет от другого, соседнего, расстояние в 2—3 метра. Напомним, что в обычном комнатном воздухе расстояние между соседними молекулами — около миллионной доли миллиметра.

Опираясь на формулы, приведенные на стр. 175, Джинс рассчитал минимальные массы сгущений, которые могли бы образоваться при различных значениях начальной плотности первичной туманности и температуры газа (от которой, как мы помним, эти массы тоже зависят). Он получил следующую таблицу, в которой массы сгущений выражены в массах Солнца.

| Плотность газоплотности, г/см ³ | Температура газа, °К | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| | 8 | 32 | 128 | 290 |
| 10 ⁻²⁹ | 2,5 · 10 ⁷ | 2 · 10 ⁸ | 1,5 · 10 ⁹ | 5 · 10 ⁹ |
| 10 ⁻³⁰ | 6,2 · 10 ⁷ | 5 · 10 ⁸ | 4 · 10 ⁹ | 1,3 · 10 ¹⁰ |
| 10 ⁻³¹ | 1,6 · 10 ⁸ | 1,3 · 10 ⁹ | 10 ¹⁰ | 3 · 10 ¹⁰ |

Полученные Джинсом значения оказывались того же порядка, как массы галактик. Правда, оценки этих масс были сделаны гораздо позже, уже после работ Хаббла, но Джинс немедленно использовал их для подкрепления своей гипотезы. В распоряжении Джинса были только две оценки масс галактик: М 31 и NGC 4594 в Деве, составлявшие соответственно $3,5 \cdot 10^9$ и $2 \cdot 10^9$ масс Солнца. Хаббл получил их следующим образом. На обсерватории Маунт Вилсон были измерены лучевые скорости вращения ядер спиральных галактик. Далее, рассматривая орбитальное движение какой-нибудь частицы на границе ядра и полагая его круговым, можно приравнять центростремительное ускорение ускорению силы тяжести (определяемому массой ядра) и вычислить отсюда эту массу. Разумеется, масса всей галактики превосходит массу ядра. Для М 31 она была оценена в $3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$.

Не нужно забывать, что в таблице приведены минимальные массы сгущений, которые могут образовываться. Потом эти сгущения будут расти за счет окружающего газа, и поэтому массы галактик должны быть больше приведенных в таблице. Во всяком случае, Джинса полученные значения масс двух галактик вполне устраивали. «Порядок величины обеих этих масс, — писал он, — указывает на то, что сгущения, образовавшиеся в первоначальной стадии из разреженной туманности, были большие внегалактические туманности, а отнюдь не отдельные звезды».

Дальше Джинс исследовал гравитационное сжатие и вращение образовавшихся туманностей. Надо помнить, что в то время эллиптические галактики еще не были разрешены на звезды, и Джинс считал их истинными туманностями. Образование звезд он рассматривал на гораздо более поздней стадии.

Джинс начал свой анализ с туманностей правильной сферической формы, которые по классификации Хаббла относятся к классу E0. Под действием сил взаимного

притяжения туманность будет сжиматься, а сжимаясь, она будет ускорять свое вращение. Как известно, вращение вокруг оси — общее свойство любых свободных тел, одна из форм их движения. Оно возникает за счет того, что скорости частиц, из которых образовалось тело, обязательно имеют составляющую, перпендикулярную радиусу. Сложение этих составляющих по закону сложения векторов определяет направление и угловую скорость вращения тела.

На основании закона сохранения момента количества движения вращающегося тела

$$M\omega r^2 = \text{const}$$

(M — масса, r — радиус и ω — угловая скорость вращения тела) при сжатии, т. е. при уменьшении r , должна возрасти угловая скорость ω .

Вследствие вращения туманность сжимается сильнее у полюсов, приобретает сплюснутость и переходит последовательно из класса E0 в классы E1, E2. Ускорение вращения по указанной причине приведет к еще более сильному полярному сжатию туманности, и она перейдет в класс E3, и так далее, до класса E7.

Дальше ход изменения структуры туманности резко меняется. Наступает такое состояние, когда скорость на экваторе столь велика, что с острого края экватора должны отделяться сгустки материи и распространяться на все большие расстояния в экваториальной плоскости. Мы переходим к классу S0.

Джинс с радостью приводил как подтверждение этой части своей гипотезы снимки галактик типов E0, E2, E4, E7 и, наконец, S0 (рис. 50).

Но что же произойдет дальше? Плотность экваториального «диска», образовавшегося в туманности, в результате полярного сжатия возрастает, и тогда опять заработает механизм гравитационной неустойчивости. Диск начнет разделяться на отдельные сгущения. Джинс и тут старался подкрепить свои соображения расчетом. Взяв за основу оценки масс ядер галактик M 31 и NGC 4594, он вычислил их среднюю плотность, поделив массу на объем, и получил значения $5 \cdot 10^{-22} \text{ г/см}^3$ (M 31) и $2 \cdot 10^{-21} \text{ г/см}^3$ (NGC 4594). Затем он построил таблицу, аналогичную приведенной выше, но для более низких значений температур: от 0,3 до 8 °К. Массы сгущений, образующихся при этом, получились у него порядка нескольких единиц или десятков масс Солнца, откуда он и сделал вывод, что на этой стадии обра-

ются звезды. Но об этом мы уже рассказывали выше (стр. 176).

Оставалось объяснить происхождение спиральных ветвей. Джинс предположил, что причиной этого являются... приливы, вызываемые соседними галактиками. В самом деле, приливное ускорение будет наибольшим в двух противоположных точках экватора галактики, расположенных

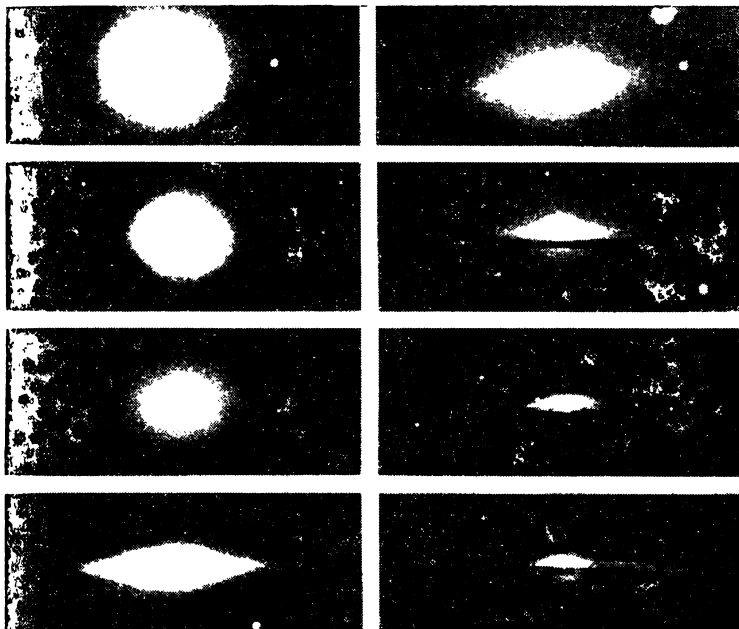


Рис. 50. Эволюция эллиптических галактик (по Джинсу).

на прямой, соединяющей ее с возмущающей галактикой. Сравнивая фотографии различных галактик, Джинс находит в них подтверждение своим представлениям.

Вот фотография галактики NGC 5866 в созвездии Дракона (рис. 51) — здесь отделение спиральных рукавов только началось, и мы видим полосу темной материи, которая представляет собой охладившуюся часть выброшенного вещества. А вот галактика NGC 5364 в созвездии Волос Вероники. Здесь мы наблюдаем более позднюю стадию, когда отделившаяся материя значительно, хотя и не

совсем, истощила массу ядра. Следующая стадия — галактика М 74 в Рыбах с хорошо развитыми спиральными структурами, но довольно заметным ядром. Еще дальше продвинулась

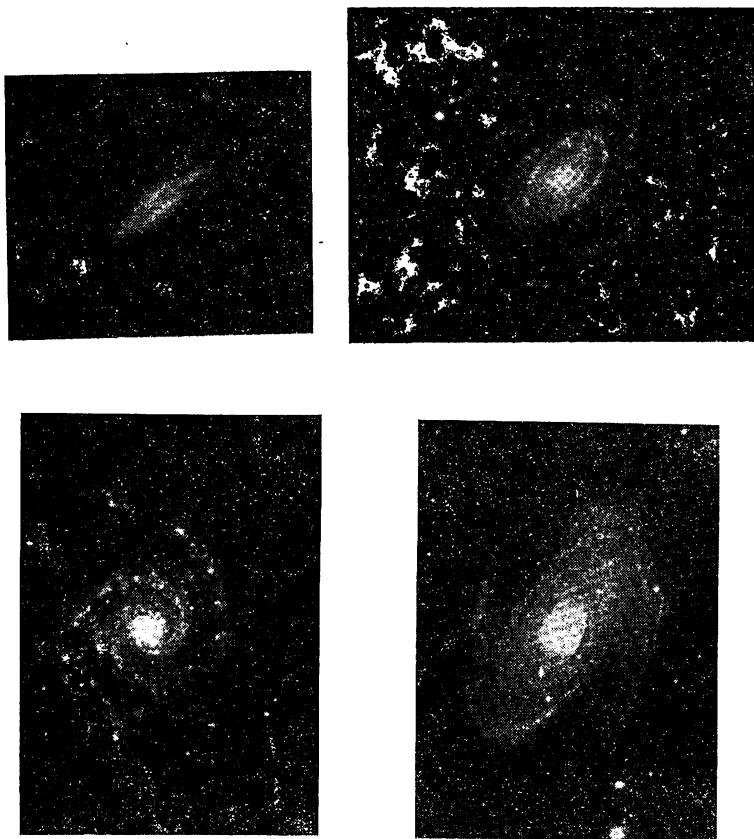


Рис. 51. Эволюция спиральных галактик (по Джинсу): сверху слева — галактика NGC 5866, сверху справа — NGC 5364, внизу слева — М 74, внизу справа — М 81.

эволюция у галактики М 101 в созвездии Большой Медведицы, где ядро совсем маленькое.

Но для галактики М 101 имелись измерения собственных движений в 100 точках (отдельных деталей, сгущений и т. п.), выполненные астрономом обсерватории Маунт Вилсон,

голландцем по происхождению, А. ван Мааненом (рис. 52). Еще в 1916 г. он измерил собственные движения в этой галактике и нашел, что они равны в среднем $0'',02$ в год и направлены по кругу. Это означало, что период вращения галактики М 101 равен 85 тысячам лет. Для галактики М 81

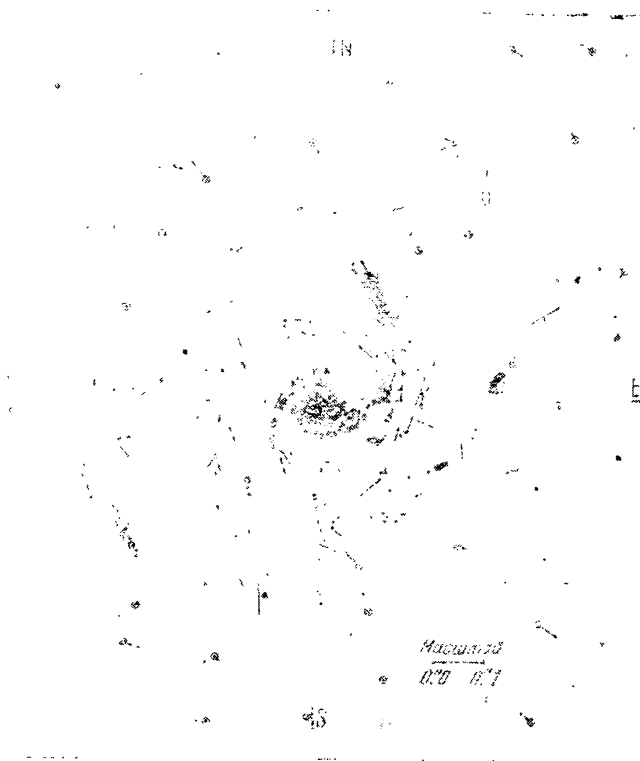


Рис. 52. Движения в галактике М 101 по ван Маанену. Масштаб собственных движений (в секундах дуги в год) показан внизу справа. Изображение самой галактики дано в другом масштабе.

тоже в созвездии Большой Медведицы) таким же путем ван Маанен получил период 58 тысяч лет, для М 51 — 45 тысяч лет. В измерениях ван Маанена Джинс усматривал подтверждение своей гипотезы: получалось, что сгущения на спиральных рукавах движутся от ядра, т. е. выброшены из него.

Увы, измерения ван Маанена оказались ошибочными, а полученные им скорости перемещения сгущений — фиктивными. В действительности, как показывают современные измерения, собственные движения деталей в галактиках не превышают $0'',001$ в столетие (не в год, а в столетие!), т. е. в 2000 раз меньше, чем получил ван Маанен. Таким образом, действительные периоды вращения галактик измеряются не десятками тысяч, а десятками и сотнями миллионов лет. Период вращения нашей Галактики, определенный голландским астрономом Я. Оортом в 1927 г., составил на расстоянии Солнца 120 миллионов лет (по современным данным — 220 миллионов лет).

Джинс, однако, не мог знать этого, когда в 1925 г. излагал свою гипотезу образования спиралей. Но он мог без труда рассчитать величину приливного ускорения, создаваемого на краю средней галактики другой, ближайшей к ней, галактикой. Как известно, величина приливного ускорения прямо пропорциональна массе возмущающего тела, расстоянию возмущаемой массы от центра масс (или в нашем примере — радиусу галактики) и обратно пропорционально кубу расстояния между возмущающим и возмущаемым телами.

Проделав соответствующий расчет, нетрудно найти, что приливные ускорения, действующие между галактиками, составляют несколько миллиардных долей того ускорения, которое сообщает Луна земным океанам, коре и атмосфере. Можно ли такому ничтожному ускорению приписать столь грандиозные процессы в галактиках, как образование спиральных рукавов? Очевидно, нельзя*).

Впрочем, это возражение (как и то, что Джинс использовал ошибочные измерения ван Маанена) относится лишь к отрезку эволюции галактик от класса S0 к классу Sc, т. е. к образованию спиральных ветвей. Спирали с перемычками (классы SB) Джинс вообще не рассматривал. А ведь они составляют 15% всех наблюдаемых нами галактик. Как мы увидим дальше, сам факт наличия таких форм галактик указывает на некоторые любопытные свойства их вращения.

*) Впрочем, иная картина получится, если мы сравним отношение приливных ускорений к ускорению силы тяготения к центру возмущаемого тела (Галактики или Земли). Для системы «Земля — Луна» это отношение равно $5 \cdot 10^{-6}$, а для системы «М 31 — Млечный Путь» $1,5 \cdot 10^{-5}$, т. е. даже втрое больше. Но это отнюдь не снимает трудности «приливной» гипотезы.

Но первая часть гипотезы Джинса (эволюция галактик от класса E0 до S0 или в крайнем случае до E7) вошла во все учебники астрономии того времени, вплоть до первой половины 40-х годов. Разложение эллиптических галактик на звезды, выполненное в 1944 г. В. Бааде, показало, что это не массы газа, а звездные системы, и выбило всякую почву из-под гипотезы Джинса. Решение проблемы эволюции галактик нужно было начинать сызнова.

Галактики молодые и старые

Какое трудное это, однако, дело — начинать все сначала. Была стройная, красивая гипотеза, и вот — приходится сдавать ее в архив науки. Правда, не все пришлось сдавать в архив. Остался на вооружении космогонистов принцип гравитационной неустойчивости, введенный Джинсом. И, как мы уже не раз видели, в дальнейших работах он находил применение в сочетании с другими физическими законами и принципами.

Но как же было подойти к проблеме эволюции галактик тогда, в середине 40-х годов? Мы помним, что эти годы ознаменовались рядом важных открытий в звездной астрономии (см. стр. 72), в частности открытием В. Бааде двух типов звездного населения и работами Б. В. Кукаркина и Н. П. Паренаго по изучению структуры и кинематики звездных подсистем в нашей и других галактиках: плоской (население I по Бааде), промежуточной и сферической (население II *). Удалось выяснить, что среди звездных скоплений, рассеянных и шаровых, имеются молодые и старые, и даже оценить их возраст.

Поэтому путь к раскрытию хода эволюции галактик, казалось бы, намечался сам собой. Нужно было произвести своеобразную «перепись населения» в галактиках разных типов и сравнить результаты. В каких галактиках: эллиптических или спиральных, в каких классах галактик преобладают более молодые или более старые звезды — такое исследование дало бы ясное указание на направление эволюции галактик, позволило бы выяснить эволюционный смысл классификации Хаббла.

Но прежде надо было выяснить численное соотношение между разными типами галактик. Непосредственное изуче-

*) В дальнейшем число известных подсистем в Галактике было увеличено (см. ниже).

ние фотографий, полученных на обсерватории Маунт Вилсон, позволило Э. Хабблу получить следующий результат:

| Эллиптические | Спиральные | Спиральные с перемычкой | Неправильные |
|---------------|------------|----------------------------|--------------|
| 23% | 59% | 15% | 3% |

Однако действительное соотношение численности галактик разных типов оказалось иным. В 1948 г. московский астроном Ю. И. Ефремов, сотрудник П. П. Паренаго и Б. В. Кукаркина, обработал данные каталога галактик Х. Шепли и А. Эймс и пришел к следующим выводам. Эллиптические галактики в среднем на 4 звездные величины слабее спиральных по абсолютной величине. Среди них много галактик-карликов. Если учесть это обстоятельство и сделать пересчет количества галактик в единице объема, то окажется, что эллиптических галактик примерно в 100 раз больше, чем спиральных. Здесь мы наблюдаем ту же картину, что и в случае звезд-гигантов и карликов. Гиганты видны издалека, карлики — только с близкого расстояния. Поэтому, несмотря на абсолютное преобладание карликов, мы наблюдаем (особенно в далеких частях Галактики и в других галактиках) больше гигантов.

Итак, большая часть спиральных галактик оказалась галактиками-гигантами, большинство эллиптических — галактиками-карликами. Конечно, среди тех и других существовал некоторый разброс в размерах, имелись и эллиптические галактики-гиганты, но в среднем было именно так. Если расположить ближайшие к нам галактики в порядке их светимости, то самой большой из них окажется галактика NGC 4594 в созвездии Девы (рис. 53) — ее абсолютная звездная величина M равна $-20^m, 7$. Следующее место, по-видимому, занимает наша Галактика ($-20^m, 0$), а за ней сразу же идет галактика M 31 в Андромеде ($-19^m, 8$). Впрочем, среди более далеких галактик есть и более яркие: галактики NGC 4874 и 4889 из скопления галактик в созвездии Волос Вероники имеют абсолютную звездную величину -22^m , т. е. они в шесть раз ярче нашей Галактики.

С другой стороны, Большое Магелланово Облако и галактика M 33 в Треугольнике имеют $M = -17^m, 5$, Малое Магелланово Облако $M = -16^m, 0$, многие карлико-

ние галактики имеют $M = -14^m$ и ниже, вплоть до $M = -6^m,5$ у небольшой неправильной галактики в Козероге (она даже слабее, чем шаровые звездные скопления).

Как же распределяются звездные населения в разных типах галактик? В 1947 г. Х. Шепли обратил внимание на то, что количество ярких сверхгигантов (представляющих собой, как мы уже знаем, молодые звезды) постепенно

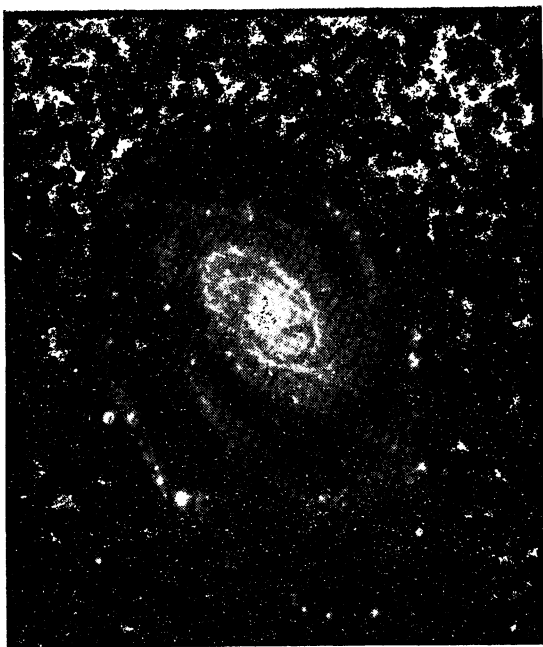


Рис. 53. Галактика NGC 4594 в Деве.

уменьшает по мере перехода от неправильных галактик к спиральным, а затем к эллиптическим. В спиральных классах, замечает Шепли, встречается лишь очень мало звезд большой светимости, а в эллиптических галактиках они практически совершенно отсутствуют. Получалось, что молодыми являются именно неправильные галактики и спирали класса Sc с сильно развитыми ветвями, а спирали класса Sa и эллиптические галактики находятся на более поздней стадии развития. Шепли тогда же высказал мысль,

что переход галактик из одного класса в другой должен был занять громадные сроки и совсем не обязательно имел место. Возможно, что галактики образовались все такими, какими мы их наблюдаем, а потом лишь медленно эволюционировали в направлении сглаживания и округления их форм.

Х. Шепли обратил внимание и еще на одно важное обстоятельство. Уже давно было известно существование двойных галактик (рис. 54). Это не были случайные совпадения



Рис. 54. Двойная галактика в Волосах.

положений, не могли они быть и результатом захвата одной галактики другой. И вот нередко в этих парах галактик сосуществовали спиральная галактика с эллиптической. Но галактики пары, очевидно, вместе и возникли. Можно ли в этом случае допустить, что они прошли существенно разный путь развития?

«В нашей борьбе с тайнами Метагалактики мы еще далеки от конца, которого нельзя даже предвидеть, — писал

в 1947 г. Шепли. — Больше измерений, больше установленных соотношений, больше глубокого теоретического анализа!.. А затем мы можем вернуться к неразрешенным задачам и пытливым размышлениям».

В этой постановке вопроса Шепли был безусловно прав. И как бы откликаясь на его призыв, советский астроном профессор Б. В. Кукаркин опубликовал в 1949 г. важную работу «Исследование строения и развития звездных систем на основе изучения переменных звезд». В ней были и новые установленные соотношения, и их глубокий теоретический анализ. С некоторыми из них мы уже познакомились.

В своей работе Б. В. Кукаркин обращал внимание на «одно лишь обнаруженное, но часто забываемое обстоятельство». Существуют не только пары, но и скопления галактик, которые также не могут быть случайной флуктуацией плотности или результатом взаимного захвата. Так вот, в этих скоплениях обнаруживаются галактики всех известных нам форм — от E0 до Sc. Между тем возраст скоплений галактик, судя по данным небесной механики, не может превышать 10^{12} лет (здесь Б. В. Кукаркин лишь отдавал дань «длинной» шкале развития звезд и звездных систем; в действительности этот предел возраста скоплений гораздо меньше).

Таким образом, получалось, что в скоплениях образовались, практически одновременно, галактики разных форм. Значит, переход каждой галактики за время ее существования из одного типа в другой совсем не обязателен: ни из E в S, ни из S в E.

К концу 40-х — началу 50-х годов в космогонии галактик сложились несколько направлений.

Представители одного из них пытались построить новую гипотезу (и даже теорию) образования галактик из каких-то первичных, догалактических форм материи. Так, немецкий физик и космогонист К. Вейцеккер разработал в 1947—1951 гг. теорию возникновения галактик из вращающейся газовой массы, в которой значительную роль играла турбулентность. По его теории, галактики развивались в направлении I — S — E. Таким образом, эллиптические галактики находятся на самой поздней, а неправильные — на самой ранней стадии развития. Но Вейцеккер ввел существенное уточнение: он показал, что в случае турбулентного развития газовых масс в галактики шкала времени такого развития пропорциональна размерам галактики. Поэтому карликовые эллиптические галактики хотя

и находятся на более поздней стадии развития, но могут быть моложе по возрасту, чем гигантские спиральные *). Это позволяло устранить возражение, связанное с тем, что в скоплениях встречаются галактики всех типов. Но тогда должна была существовать зависимость между размерами и стадией эволюции галактик в скоплениях, т. е. самые маленькие галактики там должны быть непременно эллиптическими, средние — спиральными, а большие — неправильными. И хотя между эллиптическими и спиральными галактиками такое соотношение размеров выполнялось, неправильные галактики, будучи меньше спиральных, явно не укладывались в схему Вейцзеккера.

Наконец, не согласовывался с этой гипотезой и тот факт, что в эллиптических галактиках преобладает население II типа, т. е. старые звезды (в абсолютной шкале времени). Значит, эллиптические галактики должны быть не только относительно, но и абсолютно старше спиральных. А как же быть с галактиками в скоплениях? Предположение, что эллиптические галактики образовывались раньше, а спиральные возникали в том же скоплении потом, слишком искусственно. К тому же данные о парных галактиках этому противоречат.

Выход из положения наметился благодаря работам В. А. Амбарцумяна и его школы, показавшим, что звездообразование в нашей, а значит и в других галактиках, продолжается и в наше время. Поэтому спиральные и неправильные галактики могут изобиловать молодыми звездами из населения I типа не потому, что эти галактики сами молоды, а потому, что в них имеются условия для звездообразования, тогда как в эллиптических галактиках они почему-либо отсутствуют.

В явной связи с этим стоит еще один существенный факт, на который обратил внимание Б. В. Кукаркин в уже упомянутой работе. Ни в одной эллиптической галактике, даже наиболее сжатой (E7), не обнаружено сконцентрированного к экваториальной плоскости межзвездного диффузного вещества. Обнаруженные в них диффузные включения концентрируются к центру этих галактик. Наоборот, в се спиральные галактики богаты сконцентрированным к экваториальной плоскости межзвездным диф-

*) Известно, что 20-летняя собака биологически гораздо старше 30-летнего человека. нечто подобное, по Вейцзеккеру, имеет место и в мире галактик.

фузным веществом, которое особенно четко заметно, когда галактика видна с ребра (рис. 49, 50). Об этом же свидетельствуют спектральные наблюдения: линии излучения, принадлежащие межзвездному галактическому газу, обнаружены у 80—90% спиральных галактик и только у 20% эллиптических. Правда, не надо забывать, что для образования линий излучения нужен не только газ, но и источник возбуждения свечения, т. е. горячие сверхгиганты, а их-то в эллиптических галактиках и не хватает.

Приведенный факт, наряду с работами академика Г. А. Шайна и других ученых по изучению связи молодых звезд с диффузными туманностями, побудил в 1951 г. А. И. Лебединского и Л. Э. Гуревича заняться разработкой новой гипотезы образования галактик из межгалактического газа. Их работа была закончена в 1954 г.

А. И. Лебединский, которому принадлежит основная часть гипотезы, исходил из следующих основных предположений:

1. Галактики образовались из разреженного диффузного вещества, заполнявшего (и заполняющего) Метагалактику.

2. Галактики возникали неодновременно, так что некоторые из них образовывались, когда другие уже существовали.

3. Условия в метагалактическом пространстве в период формирования галактик мало отличались от современных.

Ту массу газа, из которой образовалась наша (или какая-либо другая) Галактика, А. И. Лебединский назвал протогалактикой. Он полагал, что до начала сжатия состояние протогалактики было квазистатическим, т. е. почти неизменным. Потом какие-то постепенные количественные изменения состояния протогалактики (например, увеличение плотности) привели к тому, что она начала сжиматься. Этому могли способствовать и потери энергии молекул газа при соударении с твердыми пылинками.

Дальше сжатие протогалактики происходит почти по Джинсу: первоначально сферическая туманность вращается, сжимаясь, начинает вращаться все быстрее, что приводит к ее уплощению, притом ничем не ограниченному. Но это вовсе не эллиптическая туманность — наоборот, пока в протогалактике не возникнут звезды, она не может излучать, и мы не можем ее заметить.

Но вот на некоторой стадии сжатия и уплощения в протогалактике возникают сгущения, сначала большие, в тысячи световых лет диаметром, потом все более и более

мелкие. Самые большие дадут потом начало звездным облакам, меньшие — звездным скоплениям, еще меньшие — звездам. Образование звезд происходит путем гравитационной конденсации, механизм которой был уже описан в главе III (стр. 204). Звезды появляются в наиболее уплотненных галактиках — в спиральных. Спиральные ветви возникают потому, что в сильно уплотненных системах это энергетически выгодно (т. е. не требует затраты энергии). Наоборот, при малом уплотнении (как у эллиптических галактик, даже класса E7) ни формирование спиралей, ни образование звездных облаков невозможны.

Но вот образовалось первое поколение звезд, свет горячих сверхгигантов возбудил свечение газа — протогалактика превратилась в галактику, стала наблюдаемой. Между тем звездообразование продолжается, галактика живет и эволюционирует. Как же именно это происходит?

Теорию дальнейшей эволюции молодой спиральной галактики разработал Л. Э. Гуревич. Он доказал математически, что с образованием звезд в галактике начинается перераспределение момента количества движения, который выносится с небольшими массами наружу. Система разделяется на центральную часть, ядро, и периферическую часть, сильно сплюснутую. Дальше гравитационные взаимодействия звезд и звездных скоплений приводят к постепенному росту отклонения их движений от круговых и к «раскачке» их в направлении, перпендикулярном экватору галактики. Галактика продолжает сжиматься в направлении ее радиусов, но расширяется вдоль оси. Сплюснутость ее уменьшается. Происходит «разбрасывание» звезд из центральной части галактики во все стороны — образуется сферическая подсистема. А в плоской подсистеме продолжается образование молодых звезд из диффузной материи. Вновь образовавшиеся звезды со временем тоже уйдут из галактической плоскости. Гравитационные взаимодействия разрушат звездные скопления и ассоциации, потом распадутся звездные облака и спиральные ветви. Галактика превратится в эллиптическую. Ввиду исчерпания диффузной материи звездообразование прекратится.

Теория Л. Э. Гуревича объясняла и многие другие проблемы, как, например, образование межзвездных магнитных полей и полей около звезд, процессы ускорения заряженных частиц, образование сложных элементов.

Космогоническая концепция А. И. Лебединского и Л. Э. Гуревича явилась важным этапом в развитии космо-

гопии галактик. Конечно, и в ней были свои слабые стороны. Во-первых, в ней постулировалось существование никем не наблюдавшихся (ни раньше, ни потом) протогалактик *). Во-вторых, авторы гипотезы не дали объяснения спиральной структуры галактик, ограничившись замечанием об энергетической выгодности этой структуры. Обсуждение этого вопроса А. И. Лебединский обещал провести во второй части работы. Увы, ни он, ни Л. Э. Гуревич так и не сделали этого, и вторая часть работы не была опубликована. Постигла ли авторов теории неудача в их попытке рассмотреть формирование спиралей, или их отвлекли другие исследования, — нам неизвестно.

Работу над этой проблемой продолжил в 1958 г. ленинградский теоретик-звездник Т. А. Агемян. Изучив эволюцию вращающихся систем взаимно притягивающихся тел, имеющих форму фигур равновесия, Т. А. Агемян учел возможность их диссипации, т. е. покидания системы отдельными ее членами (звездами). В этой задаче есть нечто общее с задачей о диссипации гравитирующего объема газа. Звезды в ней играют роль газовых молекул. О возможности подобного подхода мы уже говорили на стр. 49.

Действительно, звезды, имеющие большие скорости и находящиеся во внешних частях галактики, могут совсем покинуть ее. При этом они унесут больше момента количества движения, чем приходится в среднем на одну звезду в данной части галактики. Относительный избыточный момент **), уносимый такими звездами, является функцией величины z , пропорциональной отношению двух скоростей: скорости вращения данного элемента галактики, откуда уходит звезда, и скорости звезды по отношению к этому элементу (остаточной скорости). Очевидно, что чем больше остаточная скорость звезды, тем меньше z , но тем больший момент она унесет. Обозначим момент как функцию z через $\varphi(z)$. Т. А. Агемян показал, что скорость изменения z со временем пропорциональна величине $\left[\frac{3}{2} - \varphi(z) \right]$. Эта,

*) Сгущения газа большой массы можно легко обнаружить по радиоизлучению нейтрального водорода на волне 21 см и по поглощению света далеких галактик, а также «реликтового» излучения Метагалактики (см. стр. 368).

**) Для краткости вместо слов «момент количества движения» принятый в данном случае производению массы звезды на ее расстояние от центра галактики и на трансверсальную компоненту скорости) мы здесь и далее говорим просто «момент».

казалось бы, второстепенная деталь выкладок имела кардинальное значение для понимания эволюции галактик.

Дело в том, что сжатие галактики тоже тесно связано с величиной z и будет возрастать (или убывать), если возрастает (или убывает) z . Очевидно, что если величина в скобке

положительна ($\varphi(z) < \frac{3}{2}$), то z будет возрастать, а с ним

и сжатие галактики, если же эта величина отрицательна, то z и сжатие будут убывать. Условию $\varphi(z) = \frac{3}{2}$ соответ-

ствует $z = 1,27$ и сжатие $0,74$. Получается, таким образом, что у всех галактик, имеющих сжатие меньше $0,74$, оно должно убывать, а у тех из них, у которых сжатие больше $0,74$, оно должно возрастать. Но сжатие не может перейти через роковой рубеж: по мере приближения к нему скорость изменения сжатия падает до нуля.

Вспомним теперь, что у эллиптических галактик класса E7 сжатие равно $0,7$, а галактик класса E8 не существует. Таким образом, теория Т. А. Агеяна блестяще объяснила существование предельного сжатия у эллиптических галактик. Что касается галактик спиральных, то у них сжатие, как правило, превосходит $0,74$. Теперь уже каждый поймет, к каким выводам приводит эта теория:

1. Эллиптические галактики могут развиваться только в направлении E7 — E0, а не наоборот. (Это развитие происходит, по-видимому, в соответствии с теорией Лебединского — Гуревича.)

2. Спиральные галактики развиваются в направлении все большего уплощения (теория Агеяна ничего не говорит о развитии спиралей).

3. Спиральные галактики не могут превращаться в эллиптические, и наоборот. Такие переходы запрещены.

Из теории Агеяна следовал еще и четвертый вывод, не столь очевидный:

4. Скорость эволюции галактик зависит от трех основных величин: от массы системы, концентрации в ней звезд и, главное, от значения средней остаточной скорости звезд. Для спиральных галактик эволюция этого типа протекает крайне медленно, и ее можно не принимать во внимание. Для эллиптических галактик эволюция протекает быстрее, но все же за сроки, превышающие время существования самой галактики. Поэтому превращения форм эллиптических галактик друг в друга не обязательно должны охватывать весь диапазон сжатий, от класса E7 до E0.

Таким образом, механизм Агекияна (эволюция за счет диссипации) в применении к галактикам оказывался мало эффективным, хотя он приобрел важное значение для изучения распада систем меньшего масштаба: звездных скоплений и ассоциаций *). Но наложенный его теорией запрет переходов $E \rightarrow S$ и $S \rightarrow E$ сохранил свое значение, усилив позиции сторонников точки зрения крупного голландского астронома Яна Оорта, согласно которой различные классы галактик отличаются не стадией эволюции, а начальными условиями их образования.

В случае справедливости этой точки зрения расположение галактик вдоль классификации Хаббла напоминает расположение звезд на главной последовательности: они не проходят ее всю вдоль за время своего существования, а живут на ней, каждая в своем месте, определяемом начальными условиями (у звезд — их массой, у галактик — массой, концентрацией звезд, начальным моментом вращения и другими параметрами).

Но как же все-таки образуются спиральные рукава в галактиках? И как происходит их эволюция? Поиски ответов на эти вопросы составили второе направление исследований эволюции галактик.

Как образуются спирали?

Проблема образования спиральных ветвей в галактиках находится в тесной связи с вопросом о направлении их вращения. Как это ни странно, но в этом вопросе до последнего времени не было полной ясности. Вращаются ли галактики так, что спирали закручиваются, т. е. ядро тащит их, вращаясь, за собой, или же, наоборот, спирали раскручиваются, вращаясь концами вперед?

Казалось бы, этот вопрос можно решить из наблюдений. Но дело тут далеко не просто. Мы помним о роковой ошибке ван Маанена в определении скорости вращения галактики M 101 и других, сбившей с толку Джинса. Перемещения звезд, по которым можно было бы определить скорость и направление вращения галактики, наблюдаемой как бы в плане, даже за десятки лет настолько малы, что надежно измерить их невозможно.

*) Кроме того, этот механизм имеет существенное значение при изучении эволюции ядер галактик, масса которых меньше, а концентрация звезд гораздо больше, чем в самой галактике.

Но можно применить другой способ, спектральный. Поставив щель спектрографа вдоль большой оси галактики, наблюдаемой с ребра, мы получим наклон спектральных линий, вызванный известным эффектом Доплера. Тот край галактики, который к нам приближается, даст смещение спектральных линий к фиолетовому концу, а край, который от нас удаляется, — к красному концу. По величине смещения можно без труда определить скорость и направление вращения.

Все это верно и не раз проделывалось. Но вот беда — у галактик, расположенных к нам ребром, не видны спиральные ветви. Они не могут помочь нам в решении вопроса.

Возьмем тогда галактику, расположенную к нам «вполоборота», например М 31 (рис. 46): у нее и ветви видны, и эффект Доплера использовать можно. Надо, правда, учесть угол наклона галактики к картинной плоскости, но это делается без труда.

Теперь, казалось, все у нас есть: известно, какой край галактики приближается к нам, а какой удаляется, спиральные ветви видны на фотографии. И все-таки этого мало, чтобы решить, вращается ли галактика концами спиралей вперед или тащит их за собой. Ведь мы не знаем, какая часть галактики к нам ближе: верхняя или нижняя. Между тем, как нетрудно сообразить, направление вращения галактики зависит именно от этого. Посмотрите на снимок галактики М 31 (рис. 46). Север здесь вверху, запад справа. Доплеровское смещение линий показывает, что юго-западный край галактики к нам приближается, а северо-восточный удаляется. Значит, если к нам ближе северная (верхняя) часть, галактика вращается «корнями» спиралей вперед, если ближе южная (нижняя) часть, то впереди идут концы спиралей.

Чтобы решить этот вопрос, астрономы стали изучать расположение поясов темной материи, окружающих галактику по экватору. Поиски эти тоже были затруднены, так как там, где такие пояса видны хорошо, плохо видны спиральные ветви, и наоборот. Все же удалось найти галактики, для которых этот вопрос разрешается достаточно уверенно. В их числе М 31, NGC 7331 и некоторые другие. Изучение их показало, что спиральные ветви в а к р у ч и в а ю т с я.

Между тем теоретики прилагали немало усилий, чтобы объяснить форму спиральных ветвей. Курт Вейцеккер

пытался в 1947—1951 гг. объяснить их формирование явлениями турбулентности в межзвездном газе. В результате развития турбулентных вихрей разных масштабов могут образоваться облака газа, которые растягиваются дифференциальным вращением в спиральные рукава. Это явление Фред Хойл назвал «эффектом чашки кофе». Действительно, налейте в чашку кофе и быстро замешайте его по кругу ложечкой. Когда кофе придет в быстрое вращательное движение, выньте ложку и накапайте в центральную часть чашки немного сливок. Из-за торможения о стенки чашки внешние слои кофе будут вращаться медленнее, чем внутренние, и сливки расположатся вдоль спиралей, очень напоминающих спирали галактик.

Гипотеза Вейцеккера хотя и объясняла форму ветвей, не могла объяснить много других фактов. Так, она не объясняла, почему у большинства галактик имеются только две спиральные ветви, а не больше. Образование звезд в этой схеме препятствовало возникновению других звезд, ввиду исчерпания запасов газа. Но еще одно затруднение состояло в том, что эта гипотеза не могла объяснить существование звездных облаков в спиральных и связей спиральных ветвей с ядром галактики. Эти связи, как показывали наблюдения, носили куда более сложный характер, чем вытекало из «эффекта чашки кофе». Кроме того, гипотеза Вейцеккера содержала ряд внутренних противоречий.

Шведский астроном Б. Линдبلاد в 1948—1958 гг. подробно разработал чисто динамическую теорию образования спиральных ветвей, основанную на принципах звездной динамики. К тому времени наиболее обстоятельное исследование в этой области принадлежало индийскому теоретику, работавшему в Чикагском университете, С. Чандрасекару. Впрочем, последний использовал ряд важных результатов, полученных еще в 1937—1938 гг. В. А. Амбарцумяном (см. стр. 51).

Б. Линдبلاد показал, что в звездной системе, имеющей форму эллипсоида вращения (как у ядер галактик), близ экватора может образоваться зона механической неустойчивости. Вследствие этой неустойчивости может произойти выброс некоторых групп звезд наружу. Дополнительным «стимулом» к такому движению может быть приливное воздействие со стороны другой близкой галактики, особенно в случае сильных сближений. Это и объясняет, почему спирали отделяются от ядра в двух диаметрально противоположных точках. Начавшееся «истечение» звезд из ядра

галактики в спирали не устраняет неустойчивость, а усиливает ее, так что значительная часть массы ядра переходит в спиральные ветви.

Теория Линдблада была вполне строга в математическом и механическом отношении. Но этого было далеко не достаточно для решения поставленной задачи. Основной недостаток теории Линдблада состоял в том, что она не учитывала ряда астрономических особенностей спиральных ветвей. Так, находящиеся в них молодые звезды, горячие гиганты и сверхгиганты, не могли быть выброшены из ядра, где преобладает население II типа. А главное — теория Линдблада приводила к заключению, что в случае движения вещества от ядра наружу спиральные ветви должны раскручиваться, тогда как наблюдения, как мы знаем, показали обратное. Но с точки зрения чисто гравитационной теории Линдблада это было возможно лишь при «падении» вещества на ядро.

Мы не должны винить Линдблада в этом противоречии: в те годы направление вращения галактик еще не было хорошо известно, о нем еще шли споры. Звездно-динамические работы Линдблада внесли важный вклад в динамику звездных систем, и многие его результаты и методы нашли успешное применение при решении некоторых частных задач. Но решить проблему происхождения спиральных ветвей его теория не могла. Как отметил французский астроном Э. Шацман, «такие теории не могут еще способствовать успеху космогонии, так как неопределенность в них преобладает над обоснованностью».

В еще большей степени это высказывание применимо к гипотезе взаимодействия, предложенной в 1956 г. американским астрономом Ф. Цвикки. В ней образование спиралей целиком приписывается результату близкого прохождения двух галактик друг относительно друга и приливным выбросам из их ядер. Мы уже подсчитывали на стр. 242, как малы приливные ускорения, сообщенные друг другу галактиками, находящимися на средних расстояниях. Эти ускорения можно увеличить, сближая галактики между собой: ведь приливное ускорение обратно пропорционально кубу расстояния. Так, уменьшив расстояние между галактиками в 10 раз, мы увеличим ускорение в 1000 раз. Но с уменьшением расстояния падает (примерно как квадрат расстояния) вероятность такого сближения. Кроме того, и эта гипотеза не учитывает различия звездных населений ядра и спиралей.

Впрочем, скоро мы узнаем, что в то время допускались не только сближения, но и столкновения галактик и даже прямо указывались места таких столкновений.

Изложенные выше гипотезы к концу 50-х годов отпали, хотя некоторые принципы, лежавшие в их основе (как, например, принцип гравитационной неустойчивости), полностью сохранили свое значение. Остались и продолжали развиваться две другие гипотезы: взрывная, выдвинутая около 1957 г. В. А. Амбарцумяном, и магнитная, которую в разных формах разрабатывали многие ученые. О гипотезе В. А. Амбарцумяна мы расскажем позже. О магнитной гипотезе расскажем сейчас.

Магнитное поле и спиральные рукава

Если бы каждая звезда обращалась вокруг центра Галактики по законам Кеплера, никакие устойчивые конфигурации типа спиральных ветвей и тем более перемычек (баров) у галактик SB не могли бы существовать: они были бы разрушены за 2—3 оборота Галактики. Значит, существует какая-то сила, которая их удерживает. Может ли являться такой силой магнитное поле? Действие поля на звезды ничтожно мало, и, если бы не было межзвездного газа, оно не смогло бы их удержать. Наоборот, межзвездный газ может быть управляем даже сравнительно слабыми полями. А газ своим притяжением может влиять на движение звезд. Он служит как бы передатчиком энергии от магнитного поля к звездам.

Впервые задачу устойчивости спиральных ветвей галактик с учетом магнитного поля рассмотрели в 1953 г. известные физики С. Чандрасекар и Э. Ферми. Они обобщили известную теорему о вириале, которая определяет полную энергию системы, на случай наличия магнитного поля. Для этого они включили в выражение полной энергии, наряду с кинетической и потенциальной энергиями, также магнитную энергию. Полученные общие выражения Чандрасекар и Ферми применили к задаче об устойчивости галактических спиралей. Рассматривая участок рукава спирали как цилиндр газа, находящийся во внешнем магнитном поле, и принимая во внимание наличие звезд, создающих поле тяготения, но не подверженных действию магнитного поля, Чандрасекар и Ферми получили условие устойчивости: напряженность поля должна быть $H \geq 4 \cdot 10^{-6}$ эрстеда. При этом принималась плотность газа $2 \cdot 10^{-24}$ г/см³,

плотность вещества звезд, «размазанных» по объему рукава, — вдвое больше, радиус рукава — 800 световых лет.

В том, что магнитное поле в нашей Галактике действительно существует, сомнений не было. Ряд доказательств его существования мы уже приводили в главе III. Но достаточно ли оно, чтобы удовлетворить условию устойчивости? Вот какие оценки были получены путем наблюдения различных явлений, указывавших на наличие поля:

| | |
|----------------------------|--------------------------|
| космические лучи | 10^{-6} — 10^{-5} э, |
| радиоизлучение Галактики | $3 \cdot 10^{-6}$ э, |
| поляризация света звезд *) | $2 \cdot 10^{-5}$ э. |

Все три оценки показывали, что поле, по-видимому, достаточно для поддержания устойчивости спиральных рукавов. Но сможет ли оно противостоять дифференциальному вращению?

Еще Х. Альвен в 1954 г. указал, что при вращении происходит закручивание магнитных силовых линий, в результате чего поле усиливается. В 1958 г. Ф. Хойл использовал этот эффект при построении своей гипотезы происхождения Солнечной системы. Годом позже С. Б. Пикельнер показал, что, поскольку при закручивании спиральных рукавов Галактики магнитное поле должно усилиться, это могло бы ускорять вращение более далеких и замедлять его у более близких частей спиралей. Но установится ли при этом такое стационарное состояние, при котором закручивания не будет, оставалось неясным. Откуда же берется столь важное для существования спиральных рукавов магнитное поле?

Ответ на этот вопрос дал в 1963—1964 гг. московский астрофизик Н. С. Кардашев, который развил и обосновал представление, высказанное ранее в общей форме Ф. Хойлом, о том, что магнитное поле Галактики есть метагалактическое поле, сжатое при конденсации Галактики, а потом закрученное дифференциальным вращением.

Магнитное поле Метагалактики очень слабое, порядка 10^{-11} эрстеда. Но при сжатии межгалактического газа в галактику сжимается и вмороженное в газ магнитное поле, после чего, как мы уже видели, происходит закручивание магнитных силовых линий и новое усиление поля.

*) Позднее эта оценка была понижена до $2 \cdot 10^{-6}$ э, что, впрочем, не меняло дела.

Продолжая идеи Н. С. Кардашева, английский радиотроном Дж. Пиддингтон в 1964 г. обратил внимание на то, что напряженность поля в плоской составляющей галактики (в д и с к е) будет зависеть от угла между осью вращения галактики и направлением метагалактического поля. Если этот угол велик, то поле будет сильнее.

Шаг, магнитное поле формируется вместе с галактикой. Ставалась проблема образования спиральных рукавов.

В 1965 г. С. Б. Пикельнер попытался разрешить ее, исходя из основных положений магнитно-гравитационной гипотезы.

Рассмотрим процессы сжатия и формирования магнитного поля в галактике несколько подробнее, следуя за ходом рассуждений С. Б. Пикельнера.

Если спиральные рукава образованы магнитным полем, то с каждым из них связана трубка силовых линий, проходящая через центр галактики. Чтобы сжать поле в трубку, нужно, чтобы был сильно сжат межзвездный газ. Где и как это могло произойти?

На в первую очередь в центре, в ядре галактики. Если мы рассмотрим картину распределения магнитных силовых линий в этот период, то получится то, что изображено на рис. 55, а.

Здесь силовые линии показаны в плоскости диска галактики, а в перпендикулярном направлении они сжаты еще сильнее за счет уплощения диска.

Но магнитные силовые линии обладают упругостью. Они стремятся распрямиться, а так как в центре они плотно перехвачены ядром галактики (где плотность газа в сотни раз больше, чем в диске), им приходится сжиматься в боковых частях навстречу друг другу. По галактике идет как

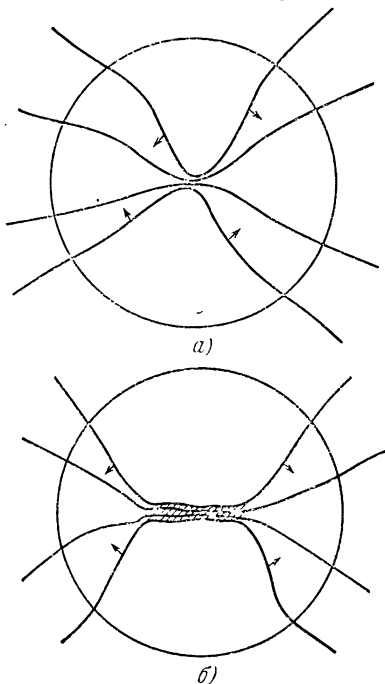


Рис. 55. Сжатие магнитных силовых линий в галактике по С. Б. Пикельнеру.

бы магнитно-гравитационная волна (рис. 55, б). Вот уже образовался центральный участок трубки, сила гравитации теперь сама сжимает газ, а сжатый газ через магнитное поле передает «сигнал возмущения» дальше, там тоже начинается конденсация и т. д. Магнитные силы начинают расти быстрее, чем газовое давление и гравитация. Так постепенно, от ядра к краевым частям, формируется трубка силовых линий, которая под действием дифференциального вращения изгибается в сторону вращения галактики, принимая форму спирали. Изгибание будет происходить до тех пор, пока не наступит равновесие между магнитными силами, стремящимися распрямить трубку и спиральный рукав, и дифференциальным вращением, стремящимся изогнуть его. Спиральный рукав можно сравнить с упругой веткой яблони, изгибаемой тяжестью висящего на ней яблока: в зависимости от веса яблока и упругости ветки она изогнется больше или меньше. Роль яблока в нашем примере играет дифференциальное вращение (вызванное увеличением тяготения с приближением к центру галактики), роль сил упругости ветки — магнитная упругость силовых линий.

За это время часть газа превращается в звезды, но они, как уже было сказано, продолжают следовать за газом, увлекаемые его гравитационными силами.

Очевидно, что если в галактике нет четко выраженной центральной конденсации, то спиральные рукава не образуются. Это мы и наблюдаем на примере неправильных галактик (I). Ясно теперь и то, почему карликовые галактики все либо эллиптические, либо тоже неправильные. У них сжатие к центру слишком мало, а диск либо не образуется вовсе, либо плотность в нем слишком мала для образования спиральных ветвей (как в галактиках S0).

Так, в общих чертах, выглядела картина формирования спиральных ветвей, по С. Б. Пикельнеру, с позиций магнитно-гравитационной гипотезы.

Забегая немного вперед, скажем, что в принципе все выводы С. Б. Пикельнера о характере действия магнитных сил в галактиках были правильны, но количественная проверка показала, что для поддержания спиральных рукавов одних этих сил недостаточно. Нелегко было объяснить и образование прямолинейных перемычек (баров) в галактиках SB (рис. 56).

Поскольку бар почти прямолинейный, значит, он вращается, как твердое тело. С другой стороны, от концов бара

от вытяг спиральные ветви, сильно закрученные, что указывает на резкое падение угловой скорости с расстоянием.

Как может бар, состоящий, как и все части галактики, из звезд и газа, вращаться, словно твердое тело? На первый взгляд это кажется невероятным. Но задумаемся в постановку задачи. Для «твердотельного» вращения бара необходимо, чтобы круговая скорость звезд бара на любом

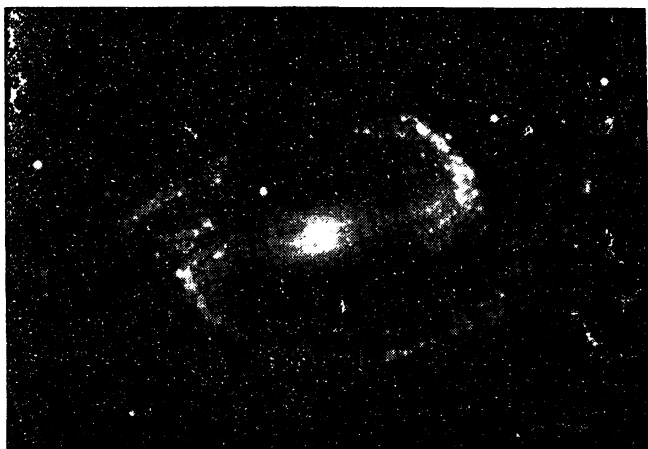


Рис. 56. Галактика NGC 1300 типа SB.

расстоянии от ядра r была пропорциональна этому расстоянию. Круговая скорость $v_{кр} = \sqrt{ar}$, где $a = v^2/r$ — центростремительное ускорение. Если рассматривать движение планеты вокруг Солнца или звезды вокруг плотного ограниченного ядра галактики, то это ускорение по закону Ньютона равно

$$a = \frac{fM}{r^2},$$

где M — масса центрального тела, f — постоянная тяготения. Тогда $v_{кр}$ будет обратно пропорциональна корню из расстояния. А теперь представим себе, что плотного центрального ядра нет, а масса внутри некоторой сферы радиуса R (где находится и наша звезда) распределена равномерно, т. е. сфера имеет постоянную плотность. В этом случае

$$a = fM \frac{r}{R^3}, \quad v_{кр} = \sqrt{\frac{fM}{R^3}} r,$$

т. е. круговая скорость как раз и будет расти пропорционально расстоянию.

Значит, нужно, чтобы до радиуса бара R плотность оставалась постоянной (или почти постоянной), а дальше резко падала бы. Как могла создаться такая ситуация?

По мнению С. Б. Пикельнера, ее мог создать в з р ы в. Да, взрыв в центре галактики. Что именно взорвалось и почему — это уже другой вопрос. Мы скоро познакомимся со взрывами в галактиках и узнаем, что они действительно происходят, намного превосходя по мощности взрывы уже знакомых нам сверхновых.

Взрыв должен был произойти на ранней стадии развития галактики, когда она была еще слабо сплющена и состояла в основном из газа. Итак, предположим, что взрыв произошел. Во все стороны от центра взрыва начнет распространяться сферическая ударная волна. На фронте волны, в сравнительно тонкой оболочке, плотность газа будет повышена, а за фронтом, во всем объеме сферы, плотность будет почти одинакова. Волна как бы «выметает» газ из шара в оболочку. После охлаждения газа оболочки начнутся процессы ее дробления и конденсации. Образовавшиеся звезды будут иметь большую потенциальную энергию (за счет энергии взрыва, отбросившей породившие их массы газа на большое расстояние от ядра), но малый момент вращения (взрыв не мог его увеличить). Эти звезды будут двигаться по сильно вытянутым орбитам, но эти орбиты не будут кеплеровыми эллипсами, поскольку распределение масс в галактиках SB совершенно иное, чем, скажем, в Солнечной системе. Как мы уже говорили, в галактиках SBc оно гораздо ближе к однородному.

Двигаясь по вытянутым орбитам, звезды оболочки заполнят внутренность сферы целиком. Остатки газа тоже будут двигаться по таким орбитам, но взаимные столкновения атомов и молекул приведут к потере энергии и торможению. Газ будет «падать» к центру галактики. По мере конденсации газа к центру начнется изгибание магнитных силовых линий (после взрыва магнитное поле, как и газ, было сосредоточено в оболочке) (рис. 57). Как и в предыдущем случае, образуется магнитно-гравитационная волна, которая сожмет газ в трубку. Помимо центральной конденсации возникнут две боковые (на пересечении трубки с оболочкой). Из этой трубки и образуется бар. На его концах из боковых конденсаций образуются сгущения старых звезд (поскольку они возникают вскоре после взрыва).

За пределами оболочки, куда фронт ударной волны еще не дошел, плотность (а значит, и круговая скорость) будет падать с расстоянием, что и приведет к излому спиральных ветвей у концов бара. Впрочем, в тех галактиках, где на концах бара нет резких сгущений, бар переходит в спиральные ветви плавно, мы имеем S-образную галактику. Магнитное поле стремится выпрямить бар, если отклонения газа от однородности будут изгибать его.

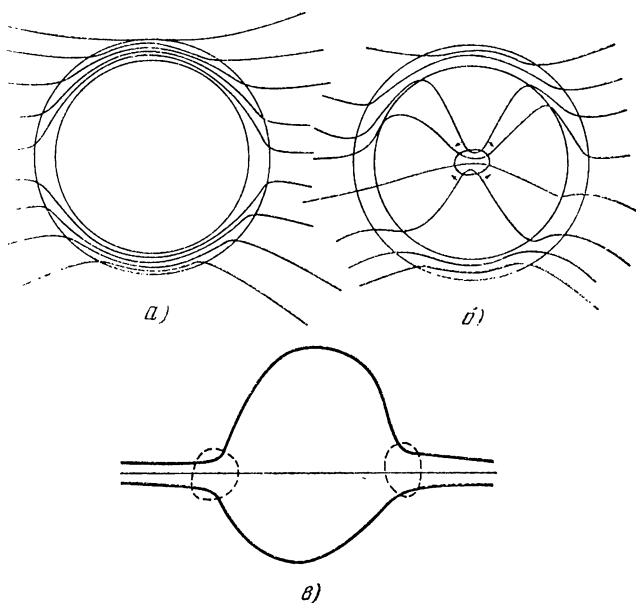


Рис. 57. Образование бара по С. Б. Пикельнеру: а) взрыв и трансформация метagalактического поля, б) начало сжатия силовых линий, в) формирование бара.

Во всех рассуждениях, приведенных выше, важную роль играло предположение, что масса самого бара мала по сравнению с массой, заключенной внутри оболочки. Так обстоит дело у галактик SBc. Наоборот, в галактиках SBA и SBb существенную роль играют масса и гравитационное поле бара. Плотность звезд здесь гораздо больше, чем в галактиках SBc, причем звезды совершают внутри бара сложные движения, а сам бар поворачивается, как твердое тело. Получается система, в которой все движения согласованы друг с другом (она называется самосогласованной).

Такова была магнитно-гравитационная гипотеза С. Б. Пикельнера, разработанная им в 1964 г. и опубликованная в 1965 г. В ней было много интересных моментов, в частности попытка решения вопроса о формировании прямолинейной перемычки — бара. Но, несмотря на справедливость ее исходных предположений и многих результатов, роль магнитных сил в поддержании спиральных рукавов и перемычек была в ней явно переоценена. Для этого требовались магнитные поля гораздо более сильные, чем имевшиеся в галактиках. Казалось, проблема снова зашла в тупик.

Выход из положения был, однако, найден. Трудности магнитной гипотезы заставили ученых совершенно по-новому подойти к проблеме спиральных ветвей.

Спиральные рукава — волновые образования

Самым главным затруднением всех теорий спиральной структуры галактик была необъяснимость их устойчивости против дифференциального вращения. Ни магнитные, ни гравитационные, ни газодинамические силы не могли преодолеть закручивания спиральных рукавов. И вот в 1961 г. уже известный нам Б. Линдبلاد предложил новую идею: спиральные рукава — не постоянные сгущения звезд и газа, а волновые образования. Конечно, в них все равно плотность газа и звезд намного больше, чем в промежутках, но «состав» этих звезд и масс газа переменный: одни приходят, другие уходят.

В 1964 г. американские астрофизики К. Лин и Ф. Шу опубликовали работу, в которой подробно развивали идею Линдблода. Впрочем, в отличие от Линдблода, Лин и Шу рассматривали не орбиты отдельных звезд в галактике, а взаимодействие всех звезд галактического диска. Предположив, что спиральная структура — это волновое образование, волны плотности, которые сохраняют свою форму, несмотря на дифференциальное вращение и гравитационное взаимодействие, Лин и Шу сумели доказать это математически. Для этого они составили систему уравнений, выразив в них распределение гравитационного потенциала, плотности вещества и компонент скорости в функции расстояния от центра галактики. Решение этих уравнений привело к уравнению спирали. Это означало, что возмущение плотности в форме спирали будет сохраняться, останется устойчивым.

Полную математическую теорию волновой гипотезы Г. Лин разработал в 1966 г. В 1969 г. К. Лин, К. Юэн и Ф. Шу применили ее к нашей Галактике, получив неплохое согласие с наблюдательными данными. Если положить основную скорость вращения спиральных рукавов Галактики равной 11 км/сек на килопарсек*), то теоретическая модель согласовывалась с наблюдаемым распределением центрального водорода в Галактике и давала правильное количество и расположение рукавов в окрестности Солнца.

Около десятка исследователей в разных странах буквально набросились на новую гипотезу и принялись проверять и разрабатывать ее, используя различные методы. В основе лежала одна идея: в галактическом диске возникает неустойчивость, которая приводит к образованию волн плотности. Надо было определить тип неустойчивости, форму волн плотности, доказать, что они будут сохраняться, сравнить результаты с наблюдениями.

Взялись за эту задачу и советские ученые: группа Г. С. Марочника из Института астрофизики в Душанбе и группа А. М. Фридмана из Новосибирского университета. Г. С. Марочник, А. А. Сучков и Н. Г. Птицына пришли к выводу, что в галактическом диске могут возникать как закручивающиеся, так и раскручивающиеся спирали, а их наложения могут образовывать кольцо (как в галактиках SBa). С другой стороны, В. Л. Поляченко, В. С. Сынах и А. М. Фридман нашли, что решающую роль в образовании волн плотности играет пучковая неустойчивость, связанная с тем, что диск вращается быстрее, чем сферическая подсистема Галактики. Им удалось объяснить, почему большинство галактик имеет две спиральные ветви или (у галактик SBa) кольцо, и найти необходимые для этого условия: при меньшей плотности плоской подсистемы образуются спирали, при большей — кольцо. Что касается галактик с баром (SBb и SBc), то их образование, по мнению группы А. М. Фридмана, связано с тем, что эти галактики обладают наибольшим моментом вращения и сферическая подсистема в них принимает форму трехосного (вытянутого) эллипсоида. В результате этого в плоской подсистеме вещество будет стягиваться преимущественно в направлении вытянутости, образуя бар.

Не остался равнодушным к волновой гипотезе и С. Б. Пикельнер. Он сразу понял ее перспективность и постарался

*) 1 килопарсек = 1000 парсек = 3260 световых лет = $3 \cdot 10^{21} \text{ см}$.

обогащать ее новыми фактами и соображениями. Если группы Л. С. Марочника и А. М. Фридмана рассматривали некоторую математическую модель галактики и строили сложные системы уравнений, исходя из этой модели, то С. Б. Пикельнер, будучи астрофизиком, стремился иметь дело с реальными галактиками, состоявшими из звезд и газа.

С. Б. Пикельнер обратил внимание на темные полосы, наблюдающиеся с внутренней стороны спиральных рукавов. Если газ и звезды вращаются быстрее, чем спиральные рукава, то они должны набегать на них именно с этой стороны. Но что произойдет, когда масса газа налетает на уже имеющееся газовое сгущение? Образуется скачок уплотнения, ударная волна. Правда, для этого нужно, чтобы скорость набегания превышала скорость звука в газе, но в данном случае это условие выполняется.

(Читатель может задать вопрос: о какой скорости звука идет речь? Разве в галактическом газе распространяются звуки? Конечно, в общепринятом смысле никаких звуков там нет, но скоростью звука принято называть скорость распространения в среде малых возмущений, а в галактическом газе они распространяются со скоростями порядка 1—10 км/сек.)

Итак, при набегании масс газа на вещество спирального рукава образуется ударная волна. Плотность газа возрастает скачком в несколько раз, и в такой же пропорции падает его скорость. Таким образом, поток газа, проходящего через какое-то поперечное сечение, не меняется при переходе через фронт ударной волны («у слов и неразрывности»). Вместе с газом тормозится и уплотняется также пыль; она-то и образует темные полосы. Плотность пыли можно оценить по производимому ею поглощению, а по плотности пыли можно оценить и плотность газа, если считать, что их отношение не меняется.

Плотность разреженного газа между рукавами нашей Галактики составляет 0,05—0,1 частицы в 1 см^3 , в рукавах в 3—5 раз больше. Как мы уже знаем (стр. 214), газ образует облака, плотность которых между рукавами равна 0,3—0,5 см^{-3} , а в рукавах 3—5 см^{-3} . За ударной волной в галактиках Sc плотность газа достигает 10—20 см^{-3} , но такая высокая плотность возможна, только если магнитное поле в галактиках Sc *) в 3—4 раза слабее, чем в нашей Галактике (принадлежащей к классу Sb).

*) Точнее, отношение напряженности поля к средней плотности вещества галактики.

Отдельные облака газа не тормозятся на фронте ударной волны, они проникают в рукав, не отклоняясь, и поток разреженного (отклонившегося) газа набегаем на них, образуется еще раз и образует темные полоски — «перья», отделившиеся от основной темной полосы.

Как же ведут себя звезды, входящие в спиральный рукав? Мы уже говорили, что в масштабах галактики звезды можно считать как бы молекулами некоего «звездного газа». Поэтому набегающие «молекулы»-звезды испытывают ту же судьбу, что и настоящие газовые молекулы, с той лишь разницей, что они не испытывают столкновений между собой, но влияют друг на друга своим притяжением, передают возмущения на расстоянии. «Звездный газ» не образует поэтому ударной волны, плотность звезд возрастает не скачком, а плавно.

Здесь пока что шла речь о старых звездах, существовавших до формирования спирального рукава. Но уплотнение газа в рукаве приводит к образованию молодых звезд, как об этом рассказывалось на стр. 218. За время своего образования они успевают несколько отойти от фронта ударной волны, и поэтому темная полоса проходит по внутреннему краю спирального рукава, образованного молодыми горячими звездами и освещаемым ими газом.

Постепенно звезды пересекают спиральный рукав, хотя и с меньшей скоростью, чем вне рукава, а затем выходят из него и ускоряют свое движение. Почему же это происходит? Торможение движения звезд поперек рукава приводит к тому, что они начинают двигаться почти в д о л ь р у - к а в а и, таким образом, приближаются к центру галактики. Под действием притяжения ядра галактики звезды, перешедшие на более близкие орбиты, приобретают большие скорости.

Сейчас рано судить, насколько все это соответствует истине. Волновая гипотеза еще очень молода, и далеко не все задачи решены ею. Но разработка ее продолжается во многих странах, и здесь можно ожидать новых интересных результатов.

НА ПРОСТОРАХ МЕТАГАЛАКТИКИ

Красное смещение

В 1912 г. астроном обсерватории Лоуэлла во Флагстаффе (Аризона, США) В. М. Слайфер, известный спектроскопист, начал систематическое определение лучевых скоростей внегалактических туманностей по их спектрам. Результаты удивили астронома: скорости этих объектов измерялись не десятками километров в секунду, как у звезд, а сотнями и тысячами километров в секунду. Но это было еще не все: почти все внегалактические туманности (напомним, что термина «галактика» тогда еще не было) у д а л я л и с ь от нас. Из 41 объекта приближались к нам немногие, и притом самые близкие: туманность Андромеды (M 31) с двумя ее спутниками, M 33 в Треугольнике и еще две-три. Позже, когда Г. Стремберг на обсерватории Маунт Вилсон установил факт движения Солнца по отношению к системе близких галактик со скоростью около 300 км/сек, а Я. Оорт в 1927 г. доказал, что это есть результат вращения Галактики, выяснилось, что эти «скорости приближения» фиктивны и вызваны тем, что Солнце движется в нашу эпоху как раз в сторону созвездий Андромеды и Треугольника. После того, как эти скорости были исправлены за галактическое вращение Солнца, они оказались совсем небольшими, от 6 до 68 км/сек.

Совсем иначе вели себя далекие галактики. Они удалялись, и скорости их удаления от нас достигали 1800 км/сек. Это привлекло внимание ученых, и определениями лучевых скоростей галактик занялись на других обсерваториях, в первую очередь М. Хьюматон на обсерватории Маунт Вилсон и Н. Мейолл на Ликской обсерватории.

Между тем, начиная с 1919 г., шведский астроном К. Лундмарк начал определять расстояния до спиральных туманностей по их угловым диаметрам. Он полагал для простоты, что их линейные размеры одинаковы, а значит,

расстояние обратно пропорционально угловому диаметру. Конечно, метод Лундмарка был неточен, но он давал правильное представление о расстояниях до галактик. Вскоре в тропном Страсбургской обсерватории Виртц установил, что у более слабых (а значит, далеких) галактик лучевая скорость больше. Открытие зависимости период—светимость у цефеид (стр. 99) позволило Э. Хаббл в 1929 г. вычислить расстояния до галактик, для которых Слайфер и другие астрономы определили лучевые скорости, и сопоставить обе эти характеристики между собой.

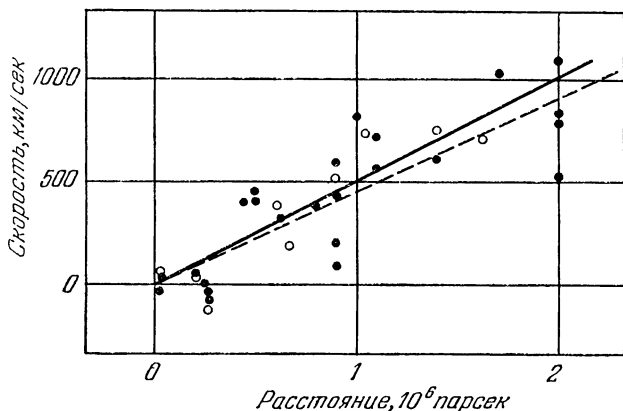


Рис. 58. График «лучевая скорость — расстояние» для близких галактик по Э. Хаббл (прерывистая линия — по данным 1929 г., сплошная — по данным 1936 г.).

Результат получился поразительный. Лучевые скорости возрастали прямо пропорционально расстоянием до галактик (рис. 58). Закон пропорциональности лучевой скорости расстоянию, выражаемый формулой $v = Hr$, получил название закона Хаббла, а коэффициент H — постоянной Хаббла. Первоначально (в 1929 г.) Хаббл определил ее значение в 500 км/сек/Мпс (километров в секунду на мегапарсек), что означало возрастание лучевой скорости на 500 км/сек с увеличением расстояния на один мегапарсек (10^6 парсек, или 3,26 миллиона световых лет). Позже выяснилось, что величина H в 5—7 раз меньше, — к каким последствиям это привело, мы расскажем ниже.

Э. Хаббл применил для определения расстояний до галактик не один способ, а несколько. Первый и самый главный был основан, как уже было сказано, на зависи-

мости период—светимость у цефеид. Определение периода цефеиды позволяло установить ее абсолютную звездную величину, а сравнение с видимой звездной величиной давало расстояние.

Второй способ состоял в сравнении блеска новых, вспыхивающих в других галактиках, с блеском новых нашей Галактики. При этом исходили из предположения, что в максимуме блеска светимость тех и других одинакова. Однако тогда еще не знали, что в других галактиках мы наблюдаем преимущественно сверхновые, которые примерно на 5^m ярче обычных новых.

В третьем способе использовали наиболее яркие звезды данной галактики, считая, что они имеют светимость, обычную для «наших» сверхгигантов. В четвертом способе сравнивались интегральный блеск и размеры шаровых звездных скоплений, также наблюдающихся в других галактиках. Был и еще ряд способов, в основе которых лежал все тот же принцип сравнения галактических и внегалактических объектов одной природы. С некоторыми из них мы еще познакомимся в конце главы.

Каждый из этих способов имел свой «радиус действия», зависевший от абсолютной светимости объекта, а значит, от возможности различить его с более или менее далекого расстояния. Но одновременное применение нескольких методов к одним и тем же галактикам позволило связать их между собой и применять для более далеких галактик методы наибольшего радиуса действия. Поскольку сверхгиганты и новые в максимуме блеска ярче цефеид, связанные с ними методы имели больший радиус действия, метод шаровых звездных скоплений — еще больший и т. д.

В своей первой работе 1929 г. Э. Хаббл использовал лучевые скорости 44 галактик, находившихся ближе 2 Мпс (6,5 миллиона световых лет). Скорости удаления их доходили до 1200 км/сек .

Но скоро астрономы стали обнаруживать галактики с еще большими красными смещениями. Скопление галактик в созвездии Пегаса удалялось, судя по смещению спектральных линий, со скоростью 3800 км/сек , скопление в Волосах Вероники — со скоростью 7500 км/сек , во Льве — со скоростью $20\,000 \text{ км/сек}$, в Большой Медведице и в Волопасе — со скоростью $40\,000 \text{ км/сек}$ (рис. 59). Расстояния до столь далеких галактик уже нельзя было определять ни одним из изложенных способов, и Хаббл применил новый прием — использование абсолютной светимости

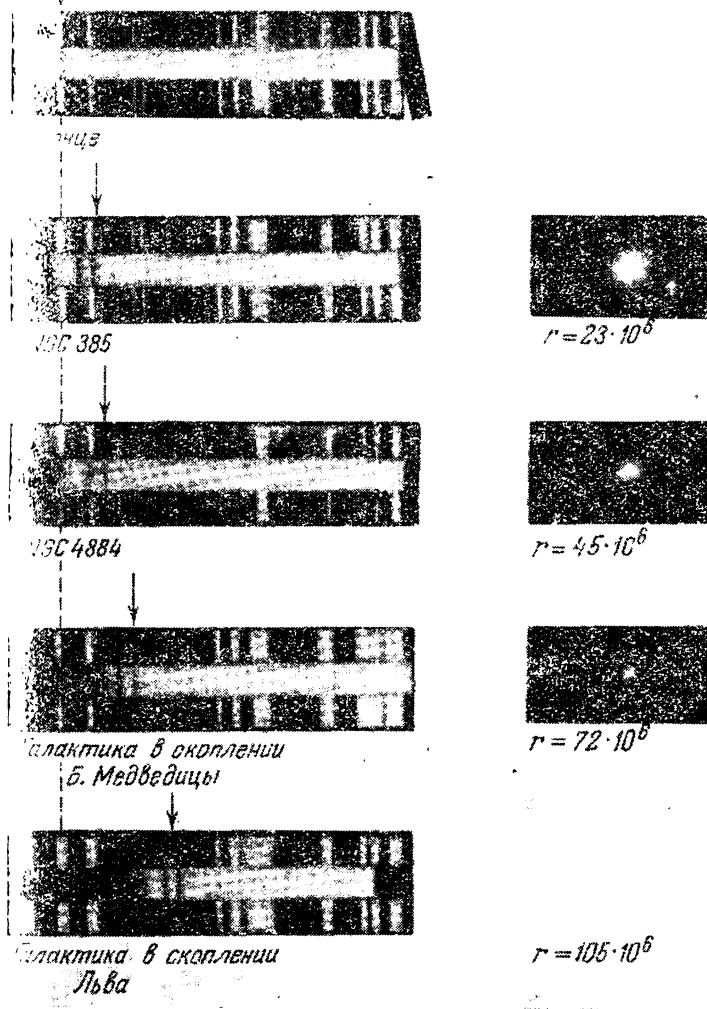


Рис. 59. Красное смещение в спектрах галактик.

всей галактики в целом. Поскольку он имел дело не с «индивидуальными» галактиками, а со скоплениями галактик, насчитывавшими по несколько сотен членов, он принимал, что самая яркая галактика в скоплении имеет ту же абсолютную светимость, как наша Галактика. Этот метод себя оправдал: получилась опять прямая пропорциональность (рис. 60).

Теперь уже закон Хаббла сам мог служить отличным методом определения расстояний до самых далеких галактик. Достаточно было получить их спектр, определить

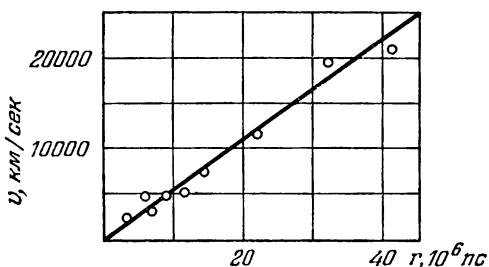


Рис. 60. Закон Хаббла для более далеких галактик.

величину красного смещения $\Delta\lambda$, получить лучевую скорость v из пропорции

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

(c — скорость света) и подставить v в формулу закона Хаббла, получив из нее расстояние r . Забегая вперед, скажем, что этот метод широко применяется и поныне.

Но это было, так сказать, прикладное значение закона Хаббла. А вот каков был его физический смысл? Почему все галактики (кроме нескольких самых близких) удаляются от нас, и притом со скоростями, возрастающими прямо пропорционально расстоянию?

Как это ни странно, но ответ на этот вопрос был дан еще за несколько лет до установления закона Хаббла.

Расширяющаяся Вселенная

В историю физики 1916 год вошел как год создания Альбертом Эйнштейном общей теории относительности. Эта теория объединила и обобщила специальную теорию относительности — физику субсветовых скоростей — на слу-

ции ускоренных движений и действия сил гравитации и одновременно ньютонову теорию тяготения на случай субсветовых (релятивистских) скоростей. Теорию Эйнштейна с полным правом можно называть о б щ е й: она определяет не только законы движения гравитирующих масс в полях тяготения с любыми скоростями, но объясняет и много других явлений. Хорошо известно, что именно общая теория относительности объяснила непонятное еще для Лавуазье движение перигелия Меркурия на $43''$ в столетие. Она предсказала два других явления: отклонение световых лучей в поле тяготения Солнца и смещение линий спектра в красную сторону в сильных полях тяготения (например, у белых карликов). Первое из них было обнаружено уже в 1919 г. при наблюдении солнечного затмения, когда рядом с закрытым Луной диском Солнца были сфотографированы звезды и удалось установить, что их смещение почти точно соответствует теории Эйнштейна. Второе — красное смещение Эйнштейна — также было обнаружено у белых карликов и массивных сверхгигантов. С этим явлением мы еще встретимся в главе VI.

Но теория Эйнштейна имела гораздо более общий характер. На основе этой теории можно было получить представление о геометрии (метрике) пространства и о некоторых свойствах Вселенной.

Эйнштейн исходил из идеи о том, что метрика пространства полностью определяется наличием и расположением в нем тяготеющих масс. В доэйнштейновской физике считалось, что свет всегда распространяется по прямой (за исключением случая дифракции). Иначе говоря, пространство полагали евклидовым. В теории Эйнштейна пространство уже неевклидово, хотя отклонения от евклидова пространства малы. Вместо привычных трех пространственных координат еще в специальной теории относительности были введены четыре координаты (добавилось время). Уравнения общей теории относительности описывают метрику пространства и поле тяготения. Они позволяют рассчитывать движение любого тела, характер распространения светового луча в любом поле тяготения и многое другое.

В 1917 г. Эйнштейн попытался вывести из своих уравнений некоторые общие свойства Вселенной. Поскольку наука о Вселенной как целом называется к о с м о л о г и е й, то Эйнштейн развивал ее на основе теории относительности, созданная им и его последователями наука о Вселенной

получила название р е л я т и в и с т с к о й к о с м о л о г и и.

Но что такое Вселенная как целое? Вопрос этот далеко не праздный. Недостаточно сказать, что Вселенная — это «все, что вообще существует», надо дать точное определение. В литературе существует несколько определений Вселенной. Мы будем называть «Большой Вселенной» весь материальный мир, объективно существующий независимо от нашего сознания. «Нашей Вселенной» будем называть часть Вселенной, в принципе доступную нашему познанию (именно в принципе, т. е. безотносительно к нашим современным возможностям познания).

Кроме этих двух понятий, относящихся к реальной Вселенной, у нас будут фигурировать различные модели Вселенной (вселенная Эйнштейна, вселенная Фридмана и др.).

Вернемся к уравнениям Эйнштейна. Решить их без дополнительных предположений было невозможно. Ведь для этого надо было точно знать расположение всех масс во Вселенной, а это было невысказано. Первым предположением Эйнштейна было, что вещество распределено во Вселенной совершенно равномерно, т. е. Вселенная полагалась однородной и изотропной (одинаковой во всех направлениях). Кроме того, Эйнштейн искал такое решение, которое не зависит от времени, является статическим. Поиски такого решения заставили его обобщить свои уравнения, добавив в них так называемый лямбда-член, обратно пропорциональный квадрату радиуса кривизны пространства R . Очевидно, что в евклидовом пространстве $R = \infty$ и $\Lambda = 0$. Для «вселенной Эйнштейна» получилось $R > 0$, $\Lambda > 0$, т. е. Вселенная оказалась замкнутой, однородной, изотропной, статической и заполненной материей. Для средней плотности $\rho_{cp} = 10^{-28}$ г/см³ (100 атомов на кубический метр!) Эйнштейн получил радиус кривизны $R = 2 \cdot 10^{27}$ см (2 миллиарда световых лет).

Иное решение получил голландский астроном В. де Ситтер. Он предположил, что средняя плотность Вселенной равна нулю, что Вселенная «пуста». Статического решения для этого случая найти не удалось. Дело в том, что введение Λ -члена равносильно введению сил отталкивания, пропорциональных расстоянию. Во «вселенной Эйнштейна» эти силы уравновешивались силами гравитационного взаимодействия, а во «вселенной де Ситтера» уравновешивать их было нечему, поэтому «вселенная де Ситтера» должна р а с ш и р я т ь с я.

Но что должно было в ней расширяться? Ведь масс этой модели Вселенной не было. Модель де Ситтера содержала внутренние противоречия, а вскоре выяснилось, что она противоречит и наблюдениям. Галактики в этой модели должны были двигаться, вообще говоря, в различных направлениях, и часть их должна была к нам приближаться. Но таких галактик, как мы уже знаем, обнаружено не много (за исключением трех ближайших, для которых и собственные скорости превосходили скорость разбега).

Была еще промежуточная модель де Ситтера—Эйнштейна, в которой $\Lambda = 0$, $R = \infty$, пространство евклидово, но в этой бесконечной Вселенной общая масса может быть как нулевой, так и бесконечной, хотя средняя плотность всегда равна нулю.

В 1922 г. за разработку непротиворечивых космологических моделей Вселенной взялся талантливый советский математик А. А. Фридман. Он начал с того, что отказался от статических моделей. Вселенная не может быть неизменной, она должна эволюционировать. Во всем остальном он сохранил предположения Эйнштейна.

А. А. Фридман получил целую серию решений для стационарной Вселенной, сначала с пространством положительной кривизны (как у сферы или эллипсоида), а затем, спустя два года, и для случая отрицательной кривизны (как у гиперболоида). Как известно, геометрия пространства отрицательной кривизны была разработана почти за 100 лет до этого Н. И. Лобачевским, а геометрия пространства положительной кривизны — немецким математиком середины XIX в. Г. Риманом. Работы Фридмана показали практическое значение неевклидовой геометрии, созданной Лобачевским и Риманом.

В решениях А. А. Фридмана представлены не только все случаи кривизны пространства (включая евклидово, включая нулевую кривизну), но и все варианты значений Λ члена: $\Lambda > 0$, $\Lambda = 0$ и $\Lambda < 0$. Решения Эйнштейна и де Ситтера были им получены как частные случаи.

Работы А. А. Фридмана были признаны А. Эйнштейном и всем ученым миром, хотя и не сразу. К сожалению, через год после выхода второй работы А. А. Фридман скончался и не смог продолжить своих исследований. Он не дождался работы Э. Хаббла, и ему, по-видимому, были неизвестны работы В. Слайфера и К. Лундмарка по определению скоростей и расстояний галактик. А ведь часть полученных

им решений как раз и говорила о возможном расширении Вселенной.

Вообще все решения Фридмана можно разделить на модели расширяющейся, пульсирующей и статической Вселенной. Отбросив статические и стационарные решения,

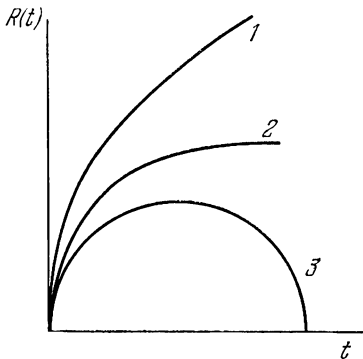


Рис. 61. Три варианта расширения Вселенной.

как не соответствующие наблюдениям, мы можем на основании решений Фридмана сделать один из следующих выводов (рис. 61):

1) Вселенная расширяется и будет расширяться неограниченно.

2) Расширение Вселенной будет постепенно замедляться гравитационными силами, пока она не придет к стационарному состоянию.

3) Вселенная пока расширяется, но спустя некоторый, довольно большой срок расширение под действием гравитационных сил остановится и сменится сжатием.

Как стало известно много позже, выбор между этими тремя возможностями зависит от величины средней плотности вещества во Вселенной ($\rho_{ср}$). Если она больше некоторой критической плотности $\rho_{кр}$, пропорциональной квадрату постоянной Хаббла, то расширение сменится сжатием, если меньше, то будет продолжаться неограниченно, если равна критической, то реализуется вторая возможность.

Во времена Эйнштейна и Фридмана полагали $\rho_{ср} = 10^{-29} \text{ г/см}^3$, а значение постоянной Хаббла 1929 г. приводит к $\rho_{кр} = 5 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3$, т. е. расширение, казалось бы, должно продолжаться вечно. Уточнение средней плотности, выполненное тем же Хабблом, дало еще меньшее значение: $\rho_{ср} = 10^{-31} \text{ г/см}^3$. Современные оценки дают $\rho_{ср} \approx 10^{-30} \text{ г/см}^3$. С другой стороны, уменьшение оценки величины постоянной Хаббла (см. стр. 269) привело к снижению оценки $\rho_{кр}$ до $5 \cdot 10^{-30} \text{ г/см}^3$. Все же и по новым оценкам $\rho_{ср} < \rho_{кр}$, а это значит, что расширение должно продолжаться безгранично.

Таким образом, из общей теории относительности следовало, что при определенных предположениях Вселенная,

в которой мы живем, расширяется. Наблюдения за разбеганием галактик это подтверждали. Отсюда и родилась теория расширяющейся Вселенной. Никто не зная о работах Фридмана, ее выдвинул бельгийский астроном (в то же время аббат) Ж. Леметр. Впрочем, в ее разработке приняли участие и другие зарубежные астрономы: А. Эддингтон, Э. Милн, Р. Толман. Посмотрим теперь на эту теорию повнимательнее и разберем ее связь с наблюдениями, а также следствия.

Прежде всего, основной факт, лежащий в основе теории расширяющейся Вселенной — разбегание галактик, — в последние годы еще не был фактом, а лишь гипотезой. Были и другие попытки объяснения красного смещения: не эффектом Доплера, а другими эффектами, не связанными с движением галактик. О них мы расскажем немного позже.

Второе важное обстоятельство состояло в том, что наша Галактика вовсе не являлась центром, откуда разбегаются галактики, как можно подумать на первый взгляд. Следствием закона Хаббла является как раз отсутствие такого центра, равноправие каждой из разбегающихся галактик в этом отношении.

Действительно, посмотрим на картину разбегания галактик (рис. 62, а) не с точки зрения наблюдателя, находящегося в нашей Галактике S , а с точки зрения наблюдателя галактики B . Для него его собственная галактика будет неподвижна, а все другие будут удаляться от B со скоростями, прямо пропорциональными расстояниям (рис. 62, б). Наша Галактика будет удаляться от B с той же скоростью, с которой, с нашей точки зрения (в нашей системе отсчета), удаляется от нас галактика B . Галактика A , лежащая на половинном расстоянии между S и B , будет удаляться от B со скоростью $v'_A = -(v_B - v_A)$. Но так как $v_B = 2v_A$, то $v'_A = -v_A$. Скорость удаления галактики C , лежащей от нас вдвое дальше B , будет $v'_C = v_C - v_B = v_B$. Для галактики D , лежащей по другую сторону от S на том же расстоянии, что и B , скорость удаления будет $v'_D = v_D + v_B = 2v_B$, и т. д. Сравним теперь скорости и расстояния в старой и новой системах отсчета. Для большей общности возьмем еще галактику E , расположенную произвольно (не на прямой SB), и спроектируем ее скорость относительно B на луч зрения BE . Для упрощения расчетов положим, однако, что $SE = EB$, т. е. $v_E = v_B$. Скорость v'_E (относительно B)

мы получим как диагональ параллелограмма, построенного на векторах v_E и $-v_B$. А поскольку треугольник SEB

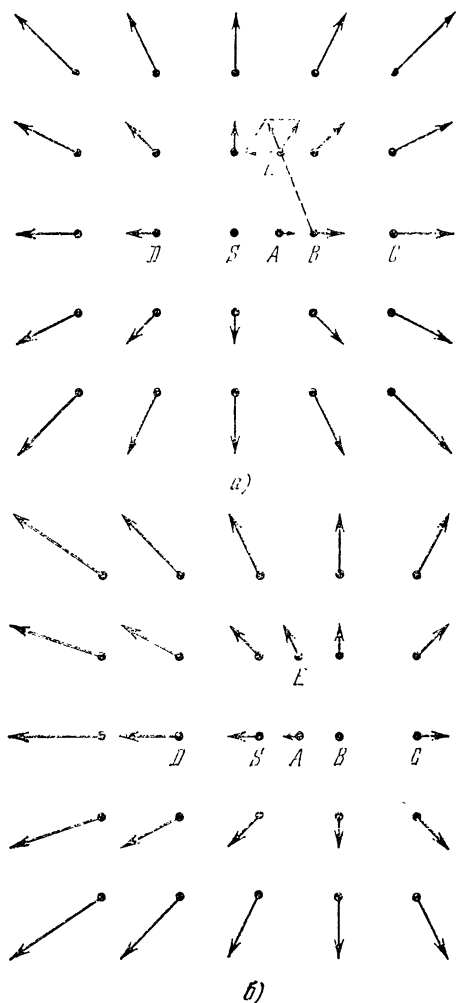


Рис. 62. Разбегание галактик с точки зрения наблюдателя, находящегося в нашей Галактике (а) и в другой галактике (б).

равносторонний, легко сообразить, что вектор v'_E будет по абсолютной величине равен вектору v_E . А теперь сведем все в таблицу. Все скорости и расстояния будем выражать

единицах скорости и расстояния галактики *B* (в системе отсчета *S*).

| Галактика | Система отсчета <i>S</i> | | Система отсчета <i>B</i> | |
|-----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|
| | расстояние | скорость | расстояние | скорость |
| <i>S</i> | 0 | 0 | 1 | 1 |
| <i>A</i> | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| <i>B</i> | 1 | 1 | 0 | 0 |
| <i>C</i> | 2 | 2 | 1 | 1 |
| <i>D</i> | 1 | 1 | 2 | 2 |
| <i>E</i> | 1 | 1 | 1 | 1 |

Мы видим, что закон Хаббла удовлетворяется и для системы отсчета галактики *B*. Аналогично это можно доказать и для любой другой галактики. (Читатель понимает, что галактику *E* мы поместили в вершину равнобедренного треугольника только ради наглядности, можно было выбрать ее в любом месте: из подобия треугольника расстояний и треугольника скоростей получится то же самое.)

Таким образом, с любой точки зрения, в любой системе отсчета все расстояния между галактиками возрастают со скоростями, пропорциональными самим расстояниям. Такой процесс можно уподобить расширению надуваемого резинового шарика: если мы нарисуем на его поверхности какие-либо фигуры, при расширении шарика они увеличатся пропорционально его размерам. Можно продолжить аналогию, используя не только поверхность, но и объем шарика. Хотя мы не видим газовых молекул, но хорошо известно, что расстояние между молекулами, находившимися в шарике до его надувания (если бы мы могли их как-то переметить), при его расширении будет расти, так как то же число «меченых» молекул придется на больший объем. Теперь поместим наш шарик в пустоту и заставим его лопнуть. Газ начнет расширяться в пустоту, и опять расстояния между молекулами будут расти, хотя их движения, из-за наличия столкновений, будут сильно отличаться от движений галактик (чтобы добиться большего сходства, надо сделать начальную плотность облака молекул столь малой, чтобы столкновениями между ними можно было пренебречь).

Необходимо отметить еще одно важное свойство расширяющейся Вселенной. В ней растут только внегалакти-

ческие расстояния и масштабы, размеры же галактик и все внутригалактические расстояния и масштабы не растут.

Итак, теория расширяющейся Вселенной подтверждалась данными наблюдений (закон Хаббла) и соответствовала целому классу решений уравнений Эйнштейна при вполне приемлемых начальных условиях. А теперь посмотрим, к каким следствиям приводила эта теория и как на нее смотрели тогда, в тридцатые годы, в Советском Союзе и за рубежом.

«Сотворение мира»

Продолжим мысленно движение галактик, подчиняющихся закону Хаббла, назад, в прошлое. Будем рассматривать это движение в системе отсчета, связанной с нашей Галактикой (от перемены системы отсчета, как легко видеть, ничего не изменится). Путь r , пройденный каждой галактикой, равен $r = vt$, где v — ее скорость, а t — время движения. Но по закону Хаббла $v = Hr$, где H — постоянная. Сравнивая оба равенства, находим $t = 1/H = \text{const}$, иначе говоря, время разбегания одно и то же для всех галактик.

Это легко понять и без формул. Допустим, что где-то произошел грандиозный взрыв и осколки взорвавшегося тела (галактики) были выброшены в разные стороны с различными скоростями. Пройденные ими пути с момента взрыва будут пропорциональны скоростям. Но этот вывод можно обернуть и сказать, что скорости пропорциональны расстояниям от места взрыва. Мы получили закон Хаббла.

Таким образом, из теории расширяющейся Вселенной следовало, что некоторый конечный период времени тому назад, равный $t_0 = 1/H$, вся Вселенная (или, точнее, вся наблюдаемая часть Вселенной) была стянута в точку, а потом *начала расширяться*. Этот процесс расширения продолжается и до сих пор *).

Конечно, нашим наблюдениям доступна лишь некоторая, хотя и большая, по нашим масштабам, часть Вселенной — Метагалактика, т. е. совокупность наблюдаемых нами галактик (и других внегалактических объектов), а также занятая ими часть пространства. Именно к Метагалактике

*) В действительности из-за постепенного замедления разбегающихся галактик $t_0 < 1/H$, но в случае $\rho_{\text{ср}} < \rho_{\text{кр}}$ это различие не превышает 20%.

и только к ней относились наблюдательные данные, свидетельствующие о расширении. Но решения уравнений Фридмана, из которых тоже следовал вывод о расширении, относились ко всей Вселенной. Поэтому Ж. Леметр, Э. Милн и другие творцы теории расширяющейся Вселенной, не ограничивая себя масштабами Метагалактики, говорили о расширении всей Вселенной.

Что же было вначале? Ведь получалось, что вся Вселенная зародилась из точки, из какого-то первичного «атома», из «атома-отца». Ж. Леметр недаром был не только астрономом, но и священнослужителем. Хотя он уверял, что его теория является физической и не апеллирует ни к каким силам, которые не были бы нам известны, в другой своей работе он цитировал пророка Исайю, говорящего о «скрытом боге», скрытом даже в начале творения. Когда же оно произошло? Это подсчитал Э. Милн. В то время принималось значение постоянной Хаббла $H = 500 \text{ км/сек/Мпс}$. Следовательно,

$$t_0 = \frac{1}{H} = \frac{3,26 \cdot 10^{22}}{500 \cdot 3,16 \cdot 10^7} \approx 2 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

Здесь $3,26 \cdot 10^{22}$ — число километров в мегапарсеке, $3,16 \cdot 10^7$ — число секунд в году.

Итак, «возраст Вселенной», согласно Милну, получался в два миллиарда лет. Два миллиарда лет назад Вселенной... не было. А затем вдруг она образовалась. Почему? Да, вероятно, по воле всемогущего бога. Бог создал мир то ли из первичного атома, то ли вообще из ничего — для него, для бога, это уже было несущественно.

Такой вывод непосредственно вытекал из теории расширяющейся Вселенной. Разумеется, советские астрономы, последовательные материалисты, не могли принять его и развернули жестокую критику теории расширяющейся Вселенной.

Эта критика шла по трем направлениям: во-первых, идеологическая критика концепции «сотворения мира» и расширения ограниченной, конечной Вселенной; во-вторых, научная критика теории расширяющейся Вселенной и релятивистской космологии в целом; в-третьих, поиск других объяснений красного смещения, не приводивших к этой концепции.

Научные исследования советских астрономов публиковались, как и теперь, в «Астрономическом журнале», критические, полемические и философские статьи — в научно-

популярном журнале «Мироведение», который стал своеобразным рупором, отражавшим позицию советских астрономов в этом и в ряде других узловых вопросов астрономии. Журнал «Мироведение» печатал и переводы статей Ж. Леметра, А. Эддингтона, Э. Милна, Дж. Джинса, Ф. Цвикки по вопросам расширения и возраста Вселенной, и критические статьи советских авторов. С научной критикой концепции расширяющейся Вселенной выступал там главным образом К. Ф. Огородников, уже известный в то время астроном, специалист по звездной динамике, внесший существенный вклад в развитие этой науки. С философской критикой упомянутой концепции выступал ответственный редактор журнала профессор В.Т.Тер-Оганезов. Хотя Тер-Оганезов искренне полагал и открыто заявлял, что защищает основные принципы диалектического материализма, его материализм не был последовательно диалектическим. Скорее это был материализм догматический, исходивший из некоторых догм и отрицавший все, что не укладывалось в эти догмы.

Как же критиковал Тер-Оганезов теорию расширения Вселенной Леметра — де Ситтера (об А. А. Фридмане он даже не упоминает)? Основное, исходное положение этой теории — это положение о конечности Вселенной, конечности пространства. Но (и тут приводится ряд отрывков из Энгельса) «марксизм ни на одну минуту не допускает мысли, будто мир, пространство может быть замкнутым, имеющим конец». Таким образом, теория расширяющейся Вселенной в своем исходном положении противоречит марксизму, материализму и должна быть отвергнута.

Такая точка зрения в 30-е — 50-е годы была широко распространена среди советских философов и излагалась во всех учебниках *). Впоследствии она получила в нашей философской литературе название наивно-традиционной. Начиная примерно с 1959 г., догматический подход к проблеме бесконечности Вселенной начал уступать место творческому подходу, основанному на известном тезисе Ленина о том, что единственным категорическим признаком, отличающим диалектический материализм от идеализма и агностицизма, является безусловное признание существования природы вне сознания и ощущения человека. «Признавая существование объективной реальности, т. е. дви-

*) См., например, Основы марксистской философии, Госполитиздат, 1958, стр. 141—142.

«...нейшей материи, независимо от нашего сознания, — писал Ленин, — материализм неизбежно должен признавать также объективную реальность времени и пространства» *).

Итак, единственное свойство времени и пространства, в котором настаивает диалектический материализм, есть не объективная реальность, независимость от нашего сознания. Вопрос же о том, конечна или бесконечна Вселенная, должен решаться на основе всей суммы наших знаний об окружающем нас мире, даваемых астрономией, физикой и другими науками.

Вопрос о конечности и бесконечности Вселенной оказался гораздо сложнее, чем он представлялся сторонникам научно-традиционной концепции. В 1958 г. советский космолог А. Л. Зельманов даже сумел доказать, что в р а з н ы х системах отсчета Вселенная может быть одновременно конечной (но неограниченно расширяющейся) и бесконечной. Это может показаться нелепым, парадоксальным, но это так, это доказано строго математически и признано как астрономами, так и философами.

Приведем пример, который покажет, что такое положение реально. Пусть массивная звезда сжимается, превращаясь в «черную дыру». Допустим, что мы можем наблюдать ее извне. Для наблюдателя, находящегося на самой звезде (то есть системе отсчета), процесс сжатия займет конечное время. Но для того, кто наблюдает извне, по мере приближения радиуса звезды к ее гравитационному радиусу темп событий начнет замедляться (из-за эйнштейновского замедления времени в сильном поле тяжести), и чем дальше, тем сильнее, так что весь процесс сжатия займет бесконечное время. Это — еще один пример относительности пространства и времени, их зависимости от системы отсчета **).

Но отсюда следует еще один важный вывод, полученный А. Л. Зельмановым. Возраст объекта, который ограничен в пространстве и расширяется от состояния достаточно большой плотности, может быть конечным в одной системе отсчета (собственной) и бесконечным в другой (внешней).

Как здесь не вспомнить замечательные слова В. И. Ленина: «Изменчивость человеческих представлений о пространстве и времени так же мало опровергает объективную

*) В. И. Ленин, Материализм и эмпириокритицизм, Политгиз, 1965, стр. 160.

†) Относительность временных интервалов была установлена Эйнштейнером и Снайдером еще в 1939 г.

реальность того и другого, как изменчивость научных знаний о строении и формах движения материи не опровергает объективной реальности внешнего мира» *).

Вернемся к критике теории расширяющейся Вселенной в 30-е годы. Итак, первый довод против нее состоял в том, что эта теория основывалась на признании конечности Вселенной, а значит, противоречила диалектическому материализму. Этот довод, как мы теперь видим, был несостоятелен. Кроме того, из решений А. А. Фридмана вытекало, что расширяющаяся Вселенная может быть и бесконечной (например при $\Lambda = 0$), так что конечность Вселенной не является неперенным требованием этой теории.

Второй, гораздо более сильный довод был направлен против идеи «сотворения мира» из «атома-отца». Действительно, выходило, что расширение Вселенной означало признание «первого толчка», божественного вмешательства, что непосредственно приводило к поповщине. Этот аргумент полностью сохранил свою силу до сих пор, если рассматривать начало расширения по Леметру. Однако возможна другая, материалистическая трактовка начальной стадии расширения, на которой мы остановимся ниже и к которой этот довод неприменим.

Третий довод заключался в том, что если Вселенная в данный момент конечна, то непонятно, что же находится за ее пределами? Материи там, очевидно, нет. Значит, там нематериальный мир, и открывается полный простор для населения его нематериальными, сверхъестественными существами (бог, ангелы, духи и т. д.).

Здесь допускалась определенная путаница понятий конечности и ограниченности («вот идет, идет Вселенная, материальный мир, а дальше — граница, и за ней лежит мир нематериальный»). Даже конечная Вселенная может (а теперь мы знаем, что и должна) быть неограниченной. Конечность Вселенной означает, что любой сигнал: световой луч, радиоволна, гравитация — не может выйти за границы некоторого объема, определяемые расположением в этом объеме тяготеющих масс. Но сигнал будет распространяться беспредельно далеко, по-прежнему оставаясь внутри этого объема (рис. 63). Причиной такого поведения сигнала будет положительная кривизна пространства, приводящая к искривлению луча.

*) В. И. Ленин, Материализм и эмпириокритицизм, Политгиздат, 1965, стр. 160—161.

Четвертый довод был направлен как раз против только что предложенной модели конечного, но неограниченного, замкнутого в себе мира. Как это ни курьезно, но здесь основная аргументация была направлена не против самой модели, а против ее наглядного объяснения в популярных книгах. Наиболее наглядным примером конечной, но неограниченной системы является поверхность шара с точки

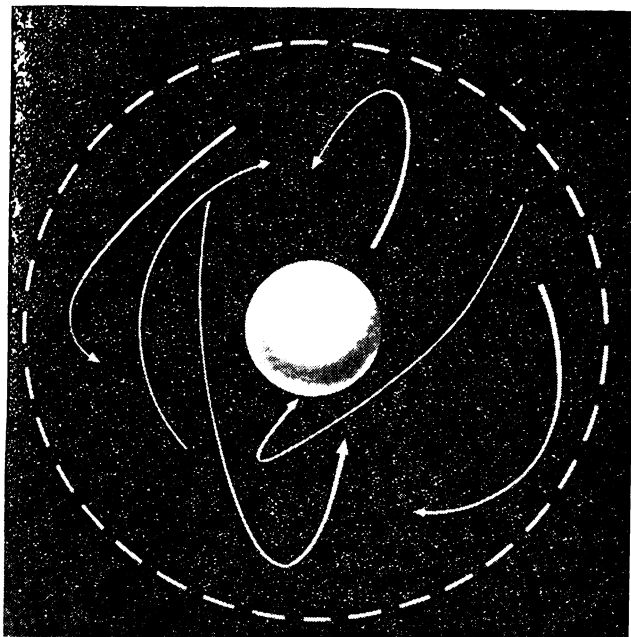


Рис. 63. Неограниченность и конечность Вселенной.

зрения ползающих по ней двумерных существ. Хотя они иногда не найдут конца этой поверхности, но для нас, существ, живущих в трех измерениях, очевидно, что шар конечен. Почти такая же ситуация была, как мы знаем, с людьми, жившими до начала эпохи Возрождения, которые искали «край Земли», не зная, что Земля — шар, и с полным правом заслуживали уподобления двумерным существам.

Так вот, заявлял В. Т. Тер-Оганезов, если для суждения о конечности неограниченного мира двумерных существ необходим выход в третье измерение, то значит для того,

чтобы убедиться, что наш трехмерный неограниченный мир конечен, нужно выйти в четвертое измерение, которого нет, а если мы его признаем, то это опять ведет к поповщине, и т. д. Таким образом, признание некоторой о б ъ е к т и в н о й р е а л ь н о с т и (а если трехмерный конечный неограниченный мир существует, то значит он реален) Тер-Оганезов связывал с возможностью ее в о с п р и я т и я в четырехмерном пространстве! Очевидно, что этот довод лишен смысла, ибо, даже если бы земная цивилизация была уничтожена до начала кругосветных путешествий (до «выхода в третье измерение»), разве это изменило бы хоть на йоту объективный факт, что Земля — шар?

Пятый довод Тер-Оганезова против теории расширяющейся Вселенной основывался на том, что при расширении должен увеличиваться ее объем и, значит, к уже существовавшему объему должны были прибавляться какие-то новые объемы. Но откуда они берутся? Пусты они или наполнены материей? А если наполнены, то откуда она взялась? Очевидно, что ее раньше не было (иначе она и занимаемый ею объем уже входили бы в состав Вселенной). Значит, она возникла из ничего, а это прямо противоречит закону сохранения материи.

Поясним сразу, что в концепции расширяющейся Вселенной материя ниоткуда не возникает и закон сохранения материи строго выполняется. Растет лишь объем, занимаемый уже существующей материей. Растет в том смысле, что расстояния между двумя любыми галактиками (или скоплениями галактик) все время увеличиваются. И это может продолжаться в принципе беспредельно.

Мы остановились так подробно на критике теории расширяющейся Вселенной В. Т. Тер-Оганезовым в статье, напечатанной 40 лет назад в давно забытом журнале «Мироведение» (№ 2 за 1934 г.), потому, что в этой статье, как в зеркале, отразились взгляды большинства советских астрономов и философов, высказывавшиеся на протяжении четверти века. И хотя в этой статье была дана наиболее сильная критика теории расширяющейся Вселенной с философских позиций *), проводимые в ней аргументы были далеко не равноценны и содержали натяжки, вызванные

*) В упоминавшемся уже учебнике «Основы марксистской философии» (см. сноску на стр. 282) критика этой теории выглядит гораздо слабее. Один из доводов авторов учебника противоречит наблюдениям, а два других — о недопустимости экстраполяции конечного на бесконечное — будут разобраны ниже.

в дальнейшем во что бы то ни стало опровергнуть эту якобы «идеалистическую» теорию.

Приведем теперь для полноты картины еще два довода против этой теории, высказанные К. Ф. Огородниковым в том же номере «Мироведения» (для удобства мы продолжим их нумерацию).

Шестой довод, многократно повторявшийся затем и самим К. Ф. Огородниковым и другими авторами, состоит в том, что нельзя экстраполировать, обобщать явления и свойства, известные для ограниченной части Вселенной (Метагалактики), на всю Вселенную. Разбегание галактик установлено лишь в пределах Метагалактики, и только к ней можно относить процесс расширения, а вовсе не ко всей бесконечной Вселенной. Метагалактика конечна, она может расширяться, сжиматься или пульсировать (по-видимому, имеет место первое), но Вселенная бесконечна, и мы не можем судить об изменениях ее как целого. Во Вселенной может быть много метагалактик, и, хотя мы их не наблюдаем, это не значит, что их нет: возможно, когда-то мы не знали о существовании других галактик. Развитие науки позволит нам когда-нибудь их обнаружить, тем более если это не случится (по чисто техническим причинам), это несколько не изменит сути дела.

Этот довод, пожалуй, был самым сильным возражением против теории расширяющейся Вселенной. С некоторыми поправками он сохраняет свое значение и поныне. Так, наблюдательные данные дают нам право говорить только о расширении Метагалактики и не более. Механически переносить этот процесс на всю Вселенную мы не имеем права. А если мы признаем это, то естественным образом отпадут все возражения, связанные с предположением о бесконечности Вселенной (в том, что Метагалактика конечна, никто не сомневается).

Нам осталось привести еще седьмой довод против теории расширяющейся Вселенной, выдвинутый одновременно рядом ученых в СССР и за рубежом (К. Ф. Огородников, Ф. Цвикки, Дж. Джинс). Дело в том, что срок расширения Вселенной по Леметру и Милну (2 миллиарда лет) оказывается меньше возраста старейших земных горных пород (1,6 миллиарда лет), меньше возраста Солнца и звезд-карликов, не говоря о нашей Галактике в целом. Вначале этот довод считался чуть ли не решающим опроверженным не только теории расширения Вселенной, но и доплеровского объяснения красного смещения. Именно он заставил искать

другие пути объяснения этого явления, о которых мы скоро расскажем.

Но этот довод был основан на первоначальном, ошибочном определении постоянной Хаббла (500 км/сек/Мпс) и полностью отпал, когда пересмотр этой постоянной увеличил срок расширения до 14—18 миллиардов лет. Как справедливо указывал В. Т. Тер-Оганезов еще в 1934 г., этот довод не мог иметь принципиального значения. Сотворил ли бог Вселенную 7 тысяч лет назад, как утверждает Библия, или 2 миллиарда лет назад, как подсчитал Милн, или даже 1000 миллиардов лет назад — дело не в сроке, а в том, допустимо ли подобное утверждение вообще.

Но тут в дискуссию вступил... римский папа Пий XII. В своем выступлении 22 ноября 1951 г. в Ватиканской академии наук он уделил особое внимание теории расширяющейся Вселенной, сославшись на открытие Хабблом разбегания галактик и сделав отсюда вывод, будто современные данные «обоснованно» говорят о пребывании материи несколько миллиардов лет назад «в столь неспостижимом состоянии», что объяснить его можно «лишь на основе «Да будет!» творца».

Основываясь на теории Леметра, Пий XII утверждал, будто современной астрономии удалось «стать в какой-то степени свидетелем того стоящего в начале времени «Да будет свет!», когда материя обрела бытие и море света и сияния внезапно появилось из нее». «Итак, — заключал Пий XII, — все указывает на то, что материальная Вселенная определенное время тому назад приобрела могучий начальный взлет, зарядилась невероятным обилием запасов энергии, благодаря которым она, развиваясь сначала быстро, затем все более медленно, приобрела свое нынешнее состояние... Таким образом, творение во времени, а потому и творец, и, следовательно, бог!»

Яснее сказать было трудно, хотя в этой речи папа Пий XII публично признавал необходимость считаться с достижениями науки и отказывался от некоторых важных положений религии, например от библейской даты сотворения мира и от дословного, канонического понимания Библии.

Неудивительно, что еще задолго до речи Пия XII советские, а также некоторые зарубежные ученые стали искать другие пути объяснения красного смещения.

Гипотеза «старения» фотонов

Идея была нелегкой. Нужно было объяснить не просто красное смещение, а смещение, возрастающее пропорционально расстоянию (закон Хаббла). Идею одного такого объяснения выдвинул еще в 1929 г. наш известный спектроскопист академик А. А. Белопольский. Он предположил, что частота (а значит, и энергия) фотонов убывает по мере движения в пространстве, причем так, что изменение частоты пропорционально пройденному расстоянию. А. А. Белопольский не дал, однако, никакого физического обоснования этой гипотезы.

Бело в том, что фотон не может расходовать энергию «просто так». По закону сохранения энергии он должен передавать ее другой частице, например электрону. Такое явление действительно может происходить и носит название «эффекта Комптона или комптоновского рассеяния» в честь американского физика А. Комптона, впервые наблюдавшего его в 1923 г. Однако из теории эффекта Комптона вытекают два неприятных вывода (с точки зрения объяснения им красного смещения): во-первых, изменение длины волны $\Delta\lambda$ при комптоновском рассеянии не зависит от самой длины волны λ ; во-вторых, при рассеянии на электроне фотон изменяет направление своего движения. Последнее означало, что для нас, земных наблюдателей, изображения далеких галактик должны были представляться нечеткими, размытыми, и тем сильнее, чем дальше галактика. Но ничего подобного в действительности не наблюдалось.

В другом варианте этой гипотезы рассматривалось спонтанное (самопроизвольное) расщепление фотонов. Однако советский физик М. П. Бронштейн еще в 1936 г. показал, что и в этом случае не выполняется постоянство отношения M/λ , а главное, вероятность такого распада фотонов зависит от длины волны, чего не должно быть.

В 1938—1940 гг. советский астроном А. Ф. Богородский предпринял самую серьезную попытку обосновать гипотезу «старения» фотонов. Он исходил из того, что фотон сам имеет массу, а значит, и гравитационное поле. Но, будучи гравитирующей частицей, фотон движется с той же скоростью, с какой распространяются гравитационные волны. Эта особенность, согласно А. Ф. Богородскому, находит свое выражение в особом роде «гравитационной самоиндукции», которая вызывает постепенную потерю энергии и «старение» фотона. Теряемые фотоном энергия и импульс

передаются окружающей среде. Богородский получил примерную пропорциональность красного смещения расстоянию, но не смог дать приемлемое физическое обоснование коэффициента пропорциональности.

В 1945 г. возможность потери энергии фотоном за счет излучения гравитационных волн исследовал советский физик Л. М. Бреховских. Он пришел к выводу, что такой эффект существует, но слишком слаб, чтобы объяснить наблюдаемые смещения линий.

В сороковые годы гипотеза «старения» фотонов получила в нашей стране известную популярность и ее даже пытались выдавать за реальный путь к решению проблемы красного смещения. Но развитие радиоастрономии позволило обнаружить красное смещение и в области радиоволн, а затем строго доказать постоянство отношения $\Delta\lambda/\lambda$ по всему спектру. К концу 50-х годов были найдены решающие доказательства того, что красное смещение имеет доплеровскую природу, т. е. что галактики действительно разбегаются (мы расскажем об этих доказательствах немного позже). Интерес к гипотезе «старения» фотонов резко упал.

И вдруг в середине 60-х годов старая гипотеза вновь была извлечена из архива науки. Толчком к этому явилось представление о существовании г р а в и т о н о в — элементарных частиц гравитации (подобно тому как фотоны — элементарные частицы электромагнитного излучения). Впервые на возможность квантования гравитационного поля, т. е. испускания гравитационных волн порциями, квантами, указал еще в 1936 г. уже упоминавшийся ленинградский физик М. П. Бронштейн. В 50-е и 60-е годы эта точка зрения получила значительное развитие в работах советских физиков Д. Д. Иваненко и К. П. Станюковича.

Но хотя из теории гравитонов вовсе не следовала гипотеза «старения» фотона, ряд зарубежных физиков (среди них — один из создателей квантовой механики, Луи де Бройль) вновь обратился к этой гипотезе. Увы, в их работах не было ничего нового, за исключением того, что потери энергии фотонов при их движении происходят не непрерывно, а порциями (в виде гравитонов). Получается, что фотон все время испускает гравитоны.

Здесь надо прежде всего заметить, что существование гравитонов пока еще экспериментально не установлено, хотя весьма вероятно. Поэтому проверить такую гипотезу пока нельзя. Зато выяснить, связано ли красное смещение в спектрах галактик с их удалением (т. е. с эффектом

Болтера) или же с другим, не доплеровским явлением, стало возможно, особенно после развития методов радиовспросомни. И данные наблюдений сказали здесь, как и в других подобных ситуациях, свое решающее слово. Оно было против гипотезы «старения» фотонов, за разбегание галактик, за объяснение красного смещения эффектом Болтера. Но, прежде чем предоставить слово данным наблюдений, мы должны познакомить вас с еще одной теорией, бывшей в течение почти 20 лет серьезной соперницей теории расширяющейся Вселенной.

Теория «стационарной» Вселенной

В 1948 г. в «Ежемесячных записках Королевского астрономического общества» одна за другой появились две статьи. Первая была написана английскими астрофизиками В. Бонди и Т. Голдом, вторая — их соотечественником, хорошо знакомым нам профессором Фредом Хойлом. В обеих статьях выдвигалась одна и та же идея, на первый взгляд столь же оригинальная, сколь и нелепая.

Оправной точкой для выдвижения новой теории послужило уже известное нам противоречие между «возрастом Вселенной» по Леметру и Милну (около 2 миллиардов лет) и возрастом Земли, Солнца и старейших звезд.

Идея кембриджских астрофизиков в основном сводилась к следующему. Красное смещение реально и объясняется эффектом Доплера. Галактики разбегаются, Вселенная расширяется. Но... и тут начинается самое главное: никакого «начального взрыва», никакого «первого толчка» не было, значит, не могло быть и «атома-отца». Вселенная бесконечна и существует вечно.

«Как здорово! — обрадуется не очень придирчивый читатель. — Ведь бесконечность и вечность Вселенной соответствуют нашей, материалистической точке зрения».

«Позвольте, — заметит его вечно сомневающийся коллега, — а как же было тогда, ну, 10 или там 18 миллиардов лет назад? Откуда же вылетели все галактики?»

Вот тут-то и таится «подводный камень» гипотезы кембриджских астрономов. Примирить свою идею с данными наблюдений они решили, сделав следующее предположение: по мере расширения Вселенной ее плотность не убывает, а остается постоянной. А добиться этого можно, только предположив, что материя во Вселенной... творится из ничего.

«Что?! — вскрикивает, как ужаленный, первый читатель. — Из ничего! Но это же прямой идеализм! А я-то думал...»

«Вот видите, — ехидничает его коллега. — Я предупреждал, я чувствовал, что тут что-то не так. Самое лучшее, знаете ли, во всем сомневаться. Тогда вас никто не проведет. Думаете, я только в этой гипотезе усомнился? Нет, я и в теорию относительности не верю. По-моему, и Ньютон ошибался. Я уж не говорю про нынешних ученых — ошибка на ошибке, а если что вроде и получается, так ведь это только кажется. А через десять лет выяснится, что дело обстоит совсем по-другому.»

Здесь автор не удержался и дал высказаться сомневающемуся читателю, чтобы тут же разбить его точку зрения. Конечно, здоровое сомнение необходимо при проверке любой гипотезы (в том числе и своей собственной). Помните Э. Р. Мустеля, который при анализе гипотез о характере вспышек новых звезд выдвигал перед каждой по несколько возражений (стр. 128). Но нельзя сомневаться во всем — это уже отдает агностицизмом, неверием в познаваемость мира и его явлений. Сменяющие друг друга гипотезы, даже неверные, приближают нас к познанию объективной истины. Роль ошибочных гипотез состоит в том, что они указывают нам, к а к н е м о ж е т б ы т ь. Они (после их анализа и доказательства их ошибочности) напоминают заграждения с надписью «Сюда не ходить!». А чем больше неверных путей мы пометим такими заграждениями, тем легче будет нам найти правильный путь.

Одним из таких неверных путей и была теория «стационарной» Вселенной. Мы называем ее теорией, а не гипотезой, потому что она была разработана математически и допускала количественную проверку данными наблюдений. Что касается творения материи «из ничего», то кембриджские астрономы не собирались открыто опровергать закон сохранения материи. Ф. Хойл исходил из допущения, что вещество (атомы) образуются во Вселенной из некоего поля. Уже были известны электромагнитное и гравитационное поля, поле ядерных сил, но Хойл поставил задачу: вывести свойства своего гипотетического поля непосредственно из уравнений Эйнштейна, так видоизменив их, чтобы масштаб Вселенной в прошлом не стремился к нулю. Для этого нужно было принять экспоненциальный закон изменения этого масштаба во времени: $R = R_0 e^{Ht}$, где

время, H — постоянная, связанная со свойствами нового поля, численно равная постоянной Хаббла.

Таким образом, картина эволюции Вселенной, по Хойлу, представляется такой. По мере разбегания галактик в межгалактическом пространстве из некоего поля, свойства и проявления которого предстоит установить, образуются элементарные частицы и атомы. Из них, вообще говоря, могут образовываться (в результате определенных астрофизических процессов) новые галактики, заполняющие пробелы между уже существующими, но раздвинувшимися в ходе расширения Вселенной. В прошлом в том объеме, который расширился до современных размеров Метагалактики, галактик было меньше, однако на единицу объема их было столько же, сколько и сейчас. Но более далекие галактики улетели от нас так далеко, что мы их обнаружить не можем.

Идея о непрерывном творении материи и сохранении стационарного состояния Вселенной принадлежала Г. Бонди и Л. Голду, а разработка этой идеи и создание математической теории были выполнены Ф. Хойлом. Позже теорию Бонди—Хойла поддержал еще один английский астрофизик — У. Мак-Кри.

В теории «стационарной» Вселенной нет ни начала, ни конца Вселенной — она вечна. Расширение происходит в любой точке пространства, поэтому никакого центра у Вселенной нет. Что касается «темпа производства» новых атомов из загадочного поля, то он невелик: достаточно, чтобы за год в кубе со стороной 1,5 км зарождался один атом водорода. Поэтому нечего было рассчитывать, что мы сможем наблюдать зарождение новых атомов непосредственно.

Однако вскоре развитие физики элементарных частиц привело к открытию важного закона, налагавшего запрет на зарождение атомов или хотя бы протонов из какого бы то ни было поля. Речь идет о законе сохранения барионного заряда. Любопытно, что этот закон был впервые сформулирован немецким физиком Э. Штукельбергом еще за 10 лет до работ Хойла и его коллег, но не имел тогда достаточного экспериментального обоснования. В 1952 г. известный советский физик (ныне академик) М. Б. Зельдович четко сформулировал закон сохранения ядерного заряда при любых ядерных реакциях. Ядерный заряд протона и нейтрона равен единице. Такой же заряд имеют все гипероны. Эти три типа элементарных частиц объединены под общим названием б а р и о н о в.

В 1955 г. итальянский физик Э. Сегре и группа американских ученых на гигантском ускорителе частиц в Беркли открыли антипротон—частицу с массой протона и отрицательным зарядом, предсказанную еще П. Дираком в 1928 г. Вскоре был открыт антинейтрон — аналог нейтрона, отличающийся от него обратным направлением собственного вращения (спина). В последующие годы были обнаружены и антигипероны, в чем немалая заслуга принадлежит советским физикам из Объединенного института ядерных исследований. Все эти частицы получили общее название а н т и б а р и о н о в. По предложению американского физика Э. Вигнера было введено понятие б а р и о н н о г о з а р я д а, который для барионов равен их ядерному заряду, т. е. 1, для антибарионов —1, а для всех прочих элементарных частиц — нулю. Закон сохранения ядерного заряда, сформулированный Я. Б. Зельдовичем, был затем обобщен Э. Вигнером и превращен в закон сохранения барионного заряда, который, как показали многочисленные эксперименты, выполняется столь же строго как законы сохранения энергии, импульса, электрического заряда.

Таким образом, в запрет образования барионов из поля была внесена поправка: барионы могут возникать, но непременно в паре с соответствующими антибарионами (протон с антипротоном, нейтрон с антинейтроном и т. д.). Этот процесс называется рождением барионных пар, но, в отличие от процесса рождения электронно-позитронных пар, для рождения барионных пар требуется колоссальная энергия, более 2000 Мэв.

Ф. Хойл немедленно попытался «приспособить» свою теорию к закону сохранения барионного заряда, опубликовав в 1956 г. совместно с Дж. Бербиджем статью о рождении барионных пар.

Однако рождающиеся пары не могли внести ничего, кроме энергии, так как возникающие антибарионы, сталкиваясь с барионами, должны аннигилировать с ними, порождая пи-мезоны (а затем нейтрино) и мощные потоки гамма-лучей. Как было установлено в 1962 г., необходимый поток гамма-излучения при постулируемой Хойлом скорости рождения барионных пар в Галактике был бы в 10^4 раз больше реально наблюдаемого с искусственных спутников Земли.

Впрочем, такими противоречиями Ф. Хойла испугать было трудно. Он на ходу переделывал свою теорию,

способляя ее к новым открытиям. В 1966 г. совместно с Дж. Нарликаром он объявил о радикальном переосмыслении своей концепции. «Творение» материи происходит не равномерно, а большими порциями в областях с сильным гравитационным полем, в так называемых «карманах». Галактики в этом варианте играют роль уже не местных неоднородностей в однородной «стационарной» Вселенной, а являются центрами таких «карманов», воспроизводящими... новое поколение галактик.

Открытие радиогалактик и квазаров (см. главу VI) побуждало Хойла пойти на дальнейшие жертвы. Он предположил, что «стационарная» Вселенная с мощными, творящими материю «карманами» могла существовать в прошлом при плотности, в 10^{20} раз превосходившей современную. Затем, вследствие образования неоднородностей, вошло в неустойчивое состояние, и «творение» прекратилось. Новые «карманы» перестали образовываться, а старые постепенно расширяться, и, в общем,... получилась модель Швингейна — де Ситтера. Но, заверял Хойл, Вселенная в целом все-таки находится в стационарном состоянии, то, что мы сейчас переживаем, — не более чем гигантская флуктуация, и «творящий» механизм может вновь включиться в любую минуту.

Г. Бонди предпочитал придерживаться «доброй старой» модели. Чего же еще: она проста, логична, доступна проверке наблюдениями. Правда, допущение непрерывного «творения» материи противоречит известным законам физики, но это ничего — оно может быть подтверждено еще не открытыми более общими закономерностями для больших масштабов Вселенной.

Но ни уговоры Бонди, ни модификации Хойла не могли спасти концепцию «стационарной» Вселенной. Ученые-материалисты отвергли ее с самого начала, как противоречащую закону сохранения материи. Странники гипотезы «большого взрыва» тоже подвергли ее резкой критике. Даже римский папа Пий XII и тот горячо осудил ее по своим, теологическим соображениям: ведь согласно Библии, бог сотворил мир единожды и всего за шесть дней, а не творит его непрерывно.

Конечно, дело было не в мнении папы, и мы привели это здесь лишь ради курьеза. Усилия сторонников теории «стационарной» Вселенной были напрасны. В том же 1966 г. в научно-популярных американских журналах стали

появляться заметки с характерными заголовками: «Крах теории творения вещества».

История науки уже произнесла этой теории свой приговор.

А все-таки она расширяется!

Чтобы окончательно решить вопрос, расширяется ли Вселенная и как именно, нужно было последовательно ответить на следующие три вопроса:

1) Объясняется ли красное смещение эффектом Доплера или каким-либо другим, не связанным с удалением галактик?

2) Если галактики действительно разбегаются, то относится ли это явление к ограниченной системе (например, к Метагалактике) или это свойство Вселенной как целого?

3) Если расширение реально, то когда оно началось и что будет с ним в дальнейшем?

Ответ на первый вопрос дала радиоастрономия. Радиоастрономические наблюдения не только подтверждали закон $\Delta\lambda/\lambda = \text{const}$ для данной галактики, но и давали возможность применить очень сильный критерий, предложенный еще в 1936 г. М. П. Бронштейном.

Если фотон в пути теряет энергию за счет распада, то у него должно быть какое-то «время жизни». Но «время жизни» распадающихся частиц зависит от их энергии, будучи прямо пропорционально ей (это проверено экспериментально на мезонах), а так как энергия фотона в свою очередь прямо пропорциональна частоте излучения, мы получаем важный результат: «время жизни» фотона прямо пропорционально частоте, а значит, вероятность распада пропорциональна длине волны. Иначе говоря, быстрее распадаться должны были бы кванты радиоволн, что не имеет ничего общего с действительностью. Хуже того — принятие гипотезы о «старении» фотона привело бы к необходимости изменить уравнения Максвелла для статического электрического поля (которое можно рассматривать как предел радиоволн, длина волны которых стремится к бесконечности).

Но допустим, что фотон распадается, отдавая часть энергии другой частице с массой покоя, равной нулю (это может быть только нейтрино). Поскольку такой процесс, как и все подобные процессы, носит статистический характер, одни кванты теряли бы больше энергии, другие меньше,

спектральные линии расширялись бы, причем тем сильнее, чем дальше галактика. Ничего подобного не наблюдается. Все эти соображения, наряду с приведенными выше (на стр. 289), дали основание академику Я. Б. Зельдовичу в 1963 г. заявить о том, что все недоплеровские механизмы красного смещения полностью отпадают. И хотя, как мы помним, попытки возродить гипотезу «старения» фотона велись и после этого, они были обречены. Их авторы были, как правило, не астрономы, они не знали о существовании других критериев, по которым можно было судить, является ли красное смещение доплеровским или нет.

Вот один из таких критериев. Представим себе систему одинаковых по своей светимости галактик, расположенных на различных расстояниях от нас. Если бы красного смещения не было, их блеск убывал бы обратно пропорционально квадрату расстояния r^2 (если пренебречь межгалактическим поглощением света).

Теперь представим себе, что красное смещение существует, но носит недоплеровский характер (т. е. галактики не разбегаются). Из-за уменьшения энергии каждого фотона возникнет дополнительное ослабление блеска далеких галактик в $(1 + z)$ раз, где $z = \Delta\lambda/\lambda = \Delta\nu/\nu$ (ν — частота излучения, а энергия, как мы помним, пропорциональна частоте).

Ну, а теперь допустим, что галактики удаляются, т. е. мы имеем дело с эффектом Доплера. Тогда помимо уменьшения энергии каждого фотона будет иметь место уменьшение их числа, поскольку каждый новый фотон будет приходить со все большего расстояния и тратить на путь до нас больше времени. Интервалы между приходом этих фотонов возрастут, а значит, число приходящих фотонов в единицу времени уменьшится, и тоже в $(1 + z)$ раз.

Таким образом, ослабление далеких галактик в случае доплеровской природы красного смещения будет в $(1 + z)$ раз сильнее, чем в случае недоплеровской его природы. А так как значения z в настоящее время для самых далеких объектов доходят до $z = 2$, то дополнительное ослабление будет втрое, т. е. более чем на одну звездную величину. Наблюдения подтверждают, что ослабление блеска далеких галактик подчиняется именно доплеровскому закону.

Еще нагляднее это проявляется в радионизлучении Метагалактики, которое доходит до нас с очень больших расстояний. Исследование И. С. Шкловского еще в 1956 г. показало, что только эффект Доплера может объяснить

сравнительно слабый фон метагалактического радиоплучения.

Наконец, имеется еще один, в принципе очень хороший метод проверки теоретических моделей наблюдениями. Нанесем на график красные смещения и расстояния далеких галактик (рис. 64). Кроме кружков, изображающих галактики, на рис. 64 проведены четыре теоретические кривые. Три из них (А, Б, В) соответствуют

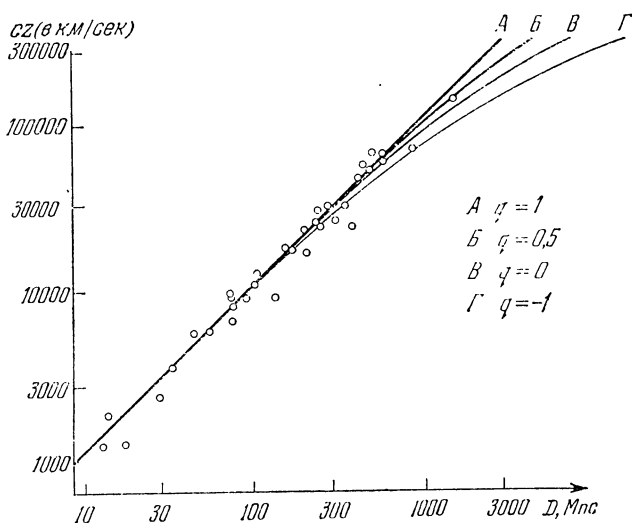


Рис. 64. Радиальные скорости и расстояния до галактик по данным наблюдений (кружки) и теории: А, Б, В соответствуют трем кривым на рис. 61, Г — теории «стационарной» Вселенной.

разным вариантам теории расширяющейся Вселенной, кривая Г — теории «стационарной» Вселенной. Чем же отличаются первые три кривые? Кривая А соответствует пространству с положительной кривизной (параметр замедления $q = 1$), кривая Б — пространству с нулевой кривизной, т. е. евклидову ($q = 0,5$), кривая В — пространству с отрицательной кривизной ($q = 0$). Величина q играет важную роль в космологии, характеризуя закон расширения: в случае В оно будет продолжаться неограниченно, в случае Б оно будет постепенно замедляться, приближаясь к некоторой предельной скорости, в случае А расширение сменится сжатием (рис. 61).

Внимательное изучение графика, построенного американским астрономом А. Сэндиджем, показывает, что до расстояний в 300 мегапарсек (1 миллиард световых лет) кривые идут так близко друг к другу, что сделать между ними выбор невозможно. Но более далекие галактики (за исключением одной) явно тяготеют к кривым А и Б, свидетельствуя в пользу моделей с положительной или нулевой кривизной. Кривая Г хуже всех удовлетворяет наблюдениям.

Теперь рассмотрим вопрос, что же именно расширяется. Наблюдения зависимости «звездная величина — красное смещение» показывают, что все доступные нашим приборам далекие внегалактические объекты — галактики — удаляются от нас в хорошем соответствии с законом Хаббла. Самые далекие из них находятся от нас на расстояниях до 10 миллиардов световых лет. Подсчеты изменения числа далеких галактик по мере их ослабления не указывают пока на приближение к границам Метагалактики. Более того, не удается обнаружить никаких намеков на анизотропию Метагалактики, т. е. различий численности галактик в разных направлениях. По-видимому, до границ Метагалактики еще далеко. Тем не менее нет оснований думать, что внешние части Метагалактики ведут себя как-то по-другому, не расширяются или расширяются по иному закону, чем изученная ее часть. Можно считать, что вся Метагалактика охвачена процессом расширения.

Итак, факт расширения Метагалактики установлен окончательно и надежно. Но можно ли сделать отсюда вывод, что расширяется вся Вселенная? Нет, такой вывод сделать нельзя. Мы не можем считать, что наша Метагалактика единственная. Могут существовать и, наверно, существуют другие метагалактики. Одни из них могут расширяться, другие — сжиматься. Наблюдательные данные не позволяют пока судить о системах большего масштаба, чем наша Метагалактика, не говоря о Вселенной как целом.

А как же теория? Ведь уравнения Эйнштейна и их решения Фридманом справедливы для всей Вселенной, поскольку они носят самый общий характер, будучи следствиями твердо установленных законов общей теории относительности. Да, это так. Но эти решения все же не вполне общие: они относятся, как уже было сказано, к однородной изотропной Вселенной. А рассматривая Вселенную как совокупность метагалактик, мы уже вводим неоднородность в большом масштабе.

Поэтому лучше сказать так. В достаточно больших масштабах, пока Вселенную можно считать однородной и изотропной (например, в масштабах Метагалактики), уравнения Эйнштейна и модели Фридмана правильно описывают поведение материи — в данном случае расширение Метагалактики. Когда же наши наблюдательные средства позволят нам выйти за пределы Метагалактики, нам понадобится уже более общая теория — теория неоднородной анизотропной Вселенной. Такую теорию сейчас разрабатывает известный советский теоретик космолог А. Л. Зельманов, а также некоторые другие ученые. Уже получены весьма интересные выводы, но мы их здесь описывать не будем, ибо это увело бы нас слишком далеко. Можно только сказать, что теория неоднородной анизотропной Вселенной принадлежит большое будущее.

А теперь нам надо вернуться в мир галактик, чтобы познакомиться с некоторыми необычными явлениями и аномальными типами галактик, а затем с новыми для нас объектами — к в а з а р а м и. Это знакомство поможет нам понять, что же произошло с Метагалактикой 18 миллиардов лет тому назад.

АНОМАЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ И КВАЗАРЫ

Галактики испускают радиоволны

Еще в 40-х годах на небе были обнаружены дискретные источники радиоизлучения, порою весьма мощные. Некоторые из них, как Телец-А, Кассиопея-А и другие, оказались связанными с радиотуманностями типа Крабовидной, остатками вспышек сверхновых. Это были объекты, расположенные в пределах нашей Галактики.

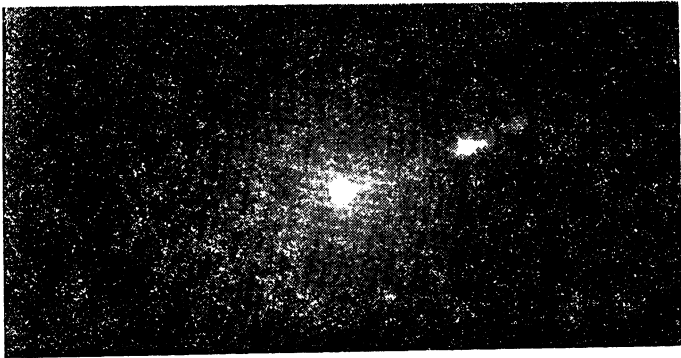


Рис. 65. Радиогалактика Девы-А (M 87, NGC 4486).

Но были объекты и другого типа. Еще в 1946 г. был обнаружен мощный радионисточник в Лебедь, уступавший по мощности радиоизлучения только Солнцу и Крабовидной туманности. Никакого заметного оптического объекта на этом месте не было. Вскоре были обнаружены дискретные источники в Деве, Стрельце и Центавре. К 1950 г. были получены их точные координаты, и можно было приступить к их отождествлению.

Эту задачу взяли на себя астрономы обсерватории Маунт Паломар В. Бааде и Р. Минковский. Начиная с 1951 г. они стали с помощью 5-метрового рефлектора систематически фотографировать участки неба, где находились радиоисточники.

Результаты не замедлили сказаться. Радиоисточник Дева-А совпал с одной из галактик скопления в созвездии Девы, находящейся на расстоянии 40 миллионов световых лет от нас. Она была довольно яркой (10-й звездной величины) и даже вошла в каталог Мессье под номером М 87. Она же известна под обозначением NGC 4486 (рис. 65).

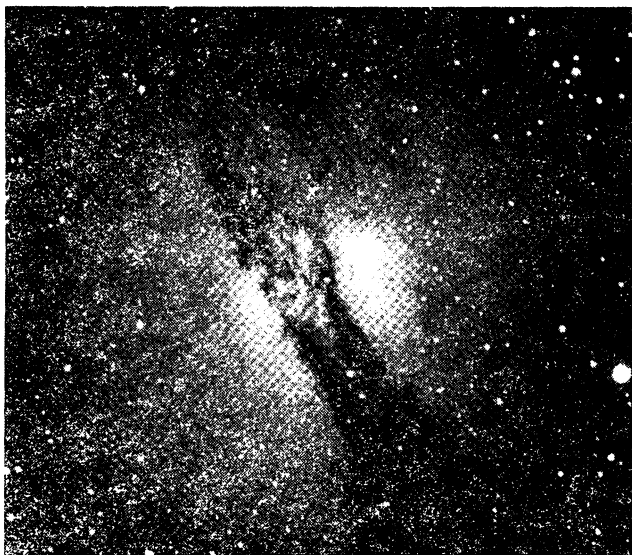


Рис. 66. Радиогалактика Центавр-А (NGC 5128).

Объект Центавр-А также совпал с известной галактикой NGC 5128, еще более яркой ($7^m,2$), отстоящей от нас на 15 миллионов световых лет (рис. 66).

И только Лебедь-А оставался загадкой, пока Бааде и Минковский в сентябре 1951 г. не получили фотографии участка неба, где находился радиоисточник. На его месте оказалась слабая галактика 17^m . Позднейшие измерения позволили определить расстояние до нее — 700 миллионов

световых лет! Но самое необычное было даже не в том, что в подобном расстоянии эта галактика посылает почти такой же поток радионизлучения, как Крабовидная туманность*). Галактика оказалась двойной!

В центре галактики Лебедь-А были ясно видны два источника размерами $5 \times 3''$, окруженные общим гало $18 \times 35''$. Еще более удивительным было то, что, как показали точные измерения координат источника радиоволн, этих источников оказалось тоже два, но они были расположены по противоположным сторонам от ядер двойной галактики, на расстоянии около $45''$ каждый (рис. 67).

В те же годы было обнаружено радиоизлучение ближайших к нам галактик — М 31 в Андромеде, М 51 в

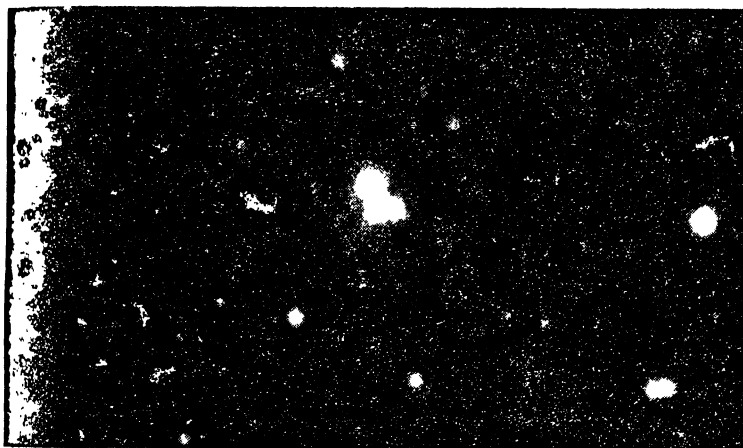


Рис. 67. Радиогалактика Лебедь-А.

Гончих Псах, М 81 в Большой Медведице, а также обоих Магеллановых Облаков. Но мощность радионизлучения этих галактик была намного меньше, чем у аномальных, или некулярных (от «resulgar» — особенный) галактик, получивших также название радиогалактик. Для примера сравним потоки излучения на частоте 158 мегагерц (длина волны около 2 метров) от «обычной» галактики М 51

*) Поскольку расстояние до Крабовидной туманности 4000 световых лет, Лебедь-А находится в 175 000 раз дальше туманности, а значит, мощность его радионизлучения в 30 миллиардов раз больше.

и радиогалактики М 87 (Дева-А). Обе они имеют почти одинаковый видимый блеск ($9-10^m$), но от первой галактики мы получаем поток $5 \cdot 10^{-26} \text{ вт/м}^2 \cdot \text{гц}$, а от второй — $1,2 \cdot 10^{-23} \text{ вт/м}^2 \cdot \text{гц}$, т. е. в 250 раз больше.

У «обычных» галактик радиоизлучение складывается из излучения входящих в их состав радиотуманностей, межзвездного газа, релятивистских электронов и в гораздо меньшей степени — звезд.

В чем же состояла причина столь мощного излучения аномальных галактик? Астрономы решили начать с самого мощного источника — Лебедь-А, поскольку он давал им в руки любопытные факты. Двойная галактика, да еще с двумя «радиоспутниками» по бокам. Что там произошло или происходит?

Столкновение или взрыв?

Вальтер Бааде, первым получивший снимок галактики Лебедь-А в сентябре 1951 г., первым же попытался дать объяснение наблюдавшейся картины. Он предположил, что мы имеем дело с двумя столкнувшимися галактиками. Притом фотографии показывали, что столкновение произошло лоб в лоб. Скорость сближения, определенная по эффекту Доплера, составляла 6000 км/сек .

Какая это должна быть ужасная катастрофа — столкновение двух галактик, подумает читатель. В каждой галактике — около ста миллиардов звезд. И вот все это сталкивается, ежесекундно одни звезды соударяются с другими, за какие-то мгновения гибнут целые миры...

На самом деле ничего подобного не произойдет, даже если галактики столкнутся. Ведь расстояния между звездами громадны по сравнению с их размерами. И звезды одной галактики спокойно пройдут между звездами другой галактики, причем на это потребуются миллионы лет.

Иначе поведет себя межзвездный газ обеих галактик. Два облака газа должны упруго оттолкнуться друг от друга и разойтись в противоположные стороны. Не они ли и являются источниками наблюдаемого радиоизлучения? Ведь эти источники расположены по бокам от двойной галактики.

Постоянный сотрудник Бааде Рудольф Минковский сперва не мог согласиться с таким экстравагантным объяснением. Он даже поспорил с Бааде на бутылку виски, доказывая маловероятность подобного столкновения. Бааде

выразил, что, если столкновение действительно произошло, томы газа в облаках должны быть сильно возбуждены и в спектре галактики должны наблюдаться эмиссионные линии. «Проверим мою гипотезу наблюдением», — предложил он. Минковский согласился, и они вместе получили ряд спектров источников Лебедь-А и Кассиопея-А с помощью небулярного спектрографа, установленного на 5-метровом телескопе. И что же — эмиссионные линии получились! Минковский признал свое поражение и отдал Бааде бутылку виски.

Пройдет 10 лет, и станет ясно, что в этом споре прав был Минковский, а не Бааде. Но отдать несправедливо полученную бутылку Бааде уже не сможет, потому что за год до окончательного решения этого спора, в 1960 г., он подстережет смерть.

О гипотезе сталкивающихся галактик Бааде поведал широкому миру (уже от имени обонх) в сентябре 1952 г., на VIII Международном астрономическом съезде в Риме. Это сообщение вызвало настоящую сенсацию.

Но нашлись и критики. Одним из первых эту гипотезу раскритиковал советский астрофизик профессор И. С. Шкловский. «Нельзя считать доказанным, — писал он, — что в созвездии Лебеда действительно наблюдается столкновение двух галактик. Очень похоже, что там наблюдается одна туманность с широкой темной полосой посредине, созданной поглощающей материей... Возможно, радиотуманность в созвездии Лебеда — это не две сталкивающиеся галактики, а одна исключительно мощная радиогалактика».

Так писал И. С. Шкловский в 1953 г. и был прав (за исключением предположения о темной полосе), но он не оказался последовательным в этом вопросе и вскоре примкнул к ставшей общепринятой точке зрения Бааде. Более того, в 1954 г. он развил теорию происхождения радиоизлучения, возникающего при столкновении галактик, и изложил ее в марте 1955 г. на Пятом совещании по вопросам космогонии, проходившем в Москве.

Газ в «коронах», окружающих каждую галактику, несмотря на его разреженность, можно считать сплошной средой, потому что длина свободного пробега атомов газа тамного меньше размеров «короны». Удар двух газовых «корон» будет частично упругим, поэтому они оттолкнутся друг от друга (рис. 68). Поскольку диаметр каждой из галактик около 120 000 световых лет, а расстояние между

«коронами» 430 000 световых лет, можно подсчитать, что с момента столкновения «короны» прошли путь, равный полуразности этих чисел, т. е. 165 000 световых лет. Двигаясь со скоростью 3000 км/сек, каждая «корона» затратила на этот путь около 16 миллионов лет. Но так как импульс передается «коронам» не мгновенно (как бильярдному шару), а за время порядка 8 миллионов лет, значит, с момента

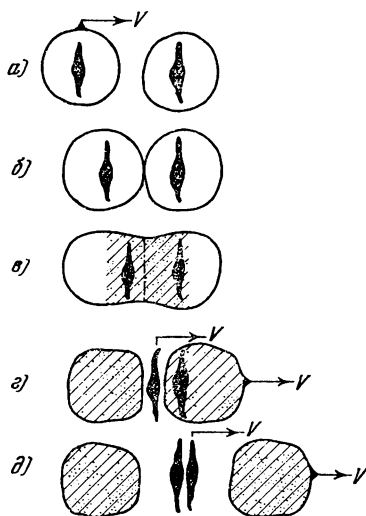


Рис. 68. Образование радиогалактики с позиций гипотезы столкновения.

столкновения прошло около 25 миллионов лет *).

Откуда же рождается радиоизлучение? И. С. Шкловский обратил внимание на то, что частотный спектр излучения Лебедя-А такой же, как у Кассиопей-А — остатка вспышки сверхновой. Значит, и механизм радиоизлучения у них один и тот же — торможение релятивистских электронов в межзвездных магнитных полях. Кинетическая энергия столкновения — около $5 \cdot 10^{59}$ эрг. За 10 миллионов лет Лебедь-А излучает энергии около $2 \cdot 10^{58}$ эрг. Таким образом, энергия столкновения в значительной части переходит в энергию релятивистских электронов, а последняя — в энергию радиоизлучения.

Вот тут-то и таилась «погибель» гипотезы столкновения. Слишком много энергии требовалось передать релятивистским электронам, к тому же не за 10, а за 25 миллионов лет — почти 10% от энергии столкновения.

Другим возражением против гипотезы столкновения была малая вероятность подобного события. Тогда Бааде совместно с Л. Спитцером подсчитал, что в скоплении галактик в Северной Короне и в Волосах Вероники вероятность столкновений такова, что каждая галактика за 3 миллиарда лет должна испытать 20 столкновений! Вы-

*) В работе И. С. Шкловского были приняты заниженные значения расстояний и размеров, поэтому он получил вдвое меньший срок, чем приведенный здесь.

ошло, что столкновение с другой галактикой — чуть ли не неизбежность для каждой звездной системы, по крайней мере принадлежащей к скоплению. А галактика в Лебедь как раз входила в такое скопление.

На том же Пятом совещании по вопросам космогонии, где И. С. Шкловский развивал теорию радиационного распада галактики Лебедь-А, исходя из гипотезы столкновений, прозвучал громкий голос против этой гипотезы. Это был голос академика В. А. Амбарцумяна. Столкновение двух галактик, а тем более лобовое, центральное, он считал в высшей степени случайным, невероятным событием. В. А. Амбарцумян привел простой, но очень сильный аргумент против такого предположения. Дело в том, что косые, нецентральные столкновения должны были бы происходить раз в сто чаще центральных. Бааде и Минковский приписывали ту же природу не только галактике Лебедь-А, но и объекту NGC 5128 (Центавр-А), где видны тоже две галактики: спиральная и эллиптическая, и объекту NGC 1275 (Персей-А), где тоже заметна двойственность галактики. Но тогда мы должны были бы наблюдать около 300 пар галактик, сталкивающихся нецентральным образом. Однако ничего подобного нет и в помине.

Вывод напрашивался сам собой, и В. А. Амбарцумян следовал ему. Мы наблюдаем в случае галактик Лебедь-А, NGC 5128 и 1275 не случайное столкновение, а закономерное разделение этих галактик на две части.

Ключ к такому выводу давала еще одна пекулярная галактика — NGC 4486, связанная с мощным источником Лева-А. Как мы уже знаем, она характерна выбросом, направленным точно по радиусу от ядра галактики. Такой выброс мог образоваться в результате сильного взрыва в ядре галактики. Но взрыв мог быть причиной и разделения всей галактики на две части. О том, что явления в галактиках NGC 4486, NGC 5128 и Лебедь-А имеют близкую природу, говорит сходство их оптических спектров: все три содержат эмиссионные линии, в частности линию ионизованного кислорода 3727 \AA . А ведь возбуждение и ионизация атомов, приводящие к появлению этих линий, могут происходить не только при столкновениях газовых «корон», но и при взрыве (вспомним спектры новых). Тем самым опровергался еще один важный аргумент Бааде, использованный им в споре с Минковским.

Амбарцумян обратил внимание и на другое. Уже давно были известны к р а т н ы е г а л а к т и к и. Конфигура-

ции их нередко напоминали системы кратных звезд типа Трапеции Ориона, которые, по всем данным, были сравнительно молодыми распадающимися образованиями. Так, может быть, кратные галактики, подобно кратным звездам, имеют общее происхождение? И у них тоже происходят процессы деления и распада, начало которых мы наблюдаем у галактик Лебедь-А и NGC 5128.

По вопросу о природе радиогалактик разгорелась горячая дискуссия. В статье «О светимостях радиогалактик», опубликованной в декабре 1956 г. в «Докладах Академии наук Армянской ССР», В. А. Амбарцумян указал на необъяснимость с точки зрения гипотезы столкновений того факта, что все радиогалактики (Лебедь-А, Дева-А, Центавр-А, Персей-А) представляют собой галактики-сверхгиганты с абсолютной величиной около -20^m . Ведь галактик-карликов гораздо больше, они должны сталкиваться чаще и, хотя интенсивность их радиоизлучения будет слабее, среди них должны быть и более близкие к нам объекты, что компенсирует малую мощность излучения. Но мы совершенно не наблюдаем карликовых радиогалактик. В другой статье Амбарцумян подсчитал, что вероятность случайного столкновения галактик в Лебеде равна 10^{-11} . Нет, не столкновение наблюдаем мы в данном случае, а деление. Могут быть два случая такого деления: ядро галактики делится на два ядра равной массы (Лебедь-А, NGC 5128) или из более крупного ядра выбрасывается меньшее (NGC 4486 = M 87).

Точку зрения В. А. Амбарцумяна поддержал Б. А. Воронцов-Вельяминов, его бывший противник в споре о звездных ассоциациях. На этот раз оба ученых выступали единым фронтом. Поддерживая идею Амбарцумяна, Воронцов-Вельяминов в марте 1957 г. обратил внимание на то, что на месте некоторых внегалактических радиоисточников мы, в сущности, наблюдаем **в з а и м о п р о н и к а ю щ и е** галактики. Но таких галактик можно обнаружить много, причем есть и состоящие из трех компонент.

Это было началом большого открытия, о котором мы расскажем позже, — открытия **в з а и м о д е й с т в у ю щ и х г а л а к т и к**. Важно было то, что у большинства взаимопроникающих галактик никакого радиоизлучения обнаружено не было, тогда как по гипотезе столкновений оно должно было быть.

В 1958 г. против гипотезы столкновений выступил американский астрофизик Джеффри Бербидж, указавший на

непомерно высокий к. п. д. при превращении энергии столкновения в энергию релятивистских электронов. По новым подсчетам Бербиджа, этот к. п. д. должен был приближаться к 100%, что совершенно невозможно.

На Парижском симпозиуме по радиоастрономии, проходившем в июле—августе 1958 г., Дж. Бербидж и австралийский радиоастроном К. Шейн выступили в поддержку гипотезы В. А. Амбарцумяна.

Годом позже супруги Маргарет и Джеффри Бербидж изучили движения облаков газа в галактике NGC 5128 и нашли, что она вращается с периодом 65 миллионов лет вокруг оси, перпендикулярной темной полосе, перерезающей галактику. Никаких быстрых движений, которые свидетельствовали бы о происшедшем там столкновении, обнаружено не было.

Наконец, в 1960 г. против гипотезы столкновений выступил и И. С. Шкловский. В том, что механизм радиоизлучения галактики Лебедь-А и других радиогалактик магнитно-тормозной, у него никаких сомнений не было: на это прямо указывал их спектр на радиочастотах. Шкловский выдвинул гипотезу, что в радиогалактиках Лебедь-А, Центавр-А и Дева-А имеет место выбрасывание из ядер намагниченных облаков газа (плазмондов), содержащих большое количество релятивистских частиц. Эти-то выбросы и образуют протяженные источники радиоизлучения, расположенные симметрично по отношению к «породившим» их галактикам. Они расширяются со скоростью около 1000 км/сек и могут существовать от 10 до 200 миллионов лет. Лебедь-А — более молодое образование, ему около 10 миллионов лет. Центавр-А гораздо старше, его возраст от 100 до 300 миллионов лет. Вообще же весьма возможно, что все радиогалактики — это объекты, подобные галактикам Лебедь-А и Центавр-А, но находящиеся на разных этапах эволюции. Лебедь-А — скорее всего краткая система с близко расположенными ядрами.

Наиболее вероятным источником релятивистских частиц в ядрах галактик, по мнению И. С. Шкловского, являются вспышки сверхновых. А поскольку при таких вспышках происходит образование тяжелых элементов, по наблюдаемому химическому составу галактики можно оценить полное количество релятивистских частиц, которое в ней образовалось за все время, а значит, и возраст галактики. Наконец, И. С. Шкловский высказал еще одну гипотезу, — что каждая галактика, в том числе и наша, в своей

молодости переживала стадию радиогалактики, подобную галактике Лебедь-А. Но Лебедь-А и Центавр-А больше, массивнее нашей Галактики, а потому их активность сейчас сильнее, чем была активность нашей Галактики в прошлом.

Джеффри Бербидж пошел еще дальше и высказал гипотезу, согласно которой мощное излучение радиогалактик объясняется цепью реакций взрывов сверхновых в центральной части галактики. При каждом взрыве выделяется большое количество гамма-лучей, которые поглощаются поверхностными слоями окружающих звезд и вызывают в каждой из них сходящуюся детонационную волну, которая и приводит к взрыву звезды. Весь процесс такого «цепного взрыва» продолжается всего лишь около 150 лет, за это время яркость галактики возрастает в 10 000 раз, растет и ее радиоизлучение. Бербидж тоже считал различные радиогалактики как бы последовательными этапами эволюции, отнеся Персей-А к первому этапу, Лебедь-А ко второму, Деву-А к третьему. ..

Известный американский астроном Отто Струве в 1961 г. выступил в популярном американском журнале «Sky and Telescope» с обзором состояния проблемы радиогалактик, рассказав о гипотезах И. С. Шкловского и Дж. Бербиджа. Последнюю гипотезу О. Струве подверг серьезной критике, хотя и не отрицал, что в очень плотных ядрах галактик цепная реакция взрывов сверхновых возможна.

Статьи Струве вызвали новую дискуссию на страницах «Sky and Telescope». Рудольф Минковский выступил в защиту гипотезы, выдвинутой им и Бааде после известной истории с бутылкой виски. Впрочем, он уже не настаивал на том, что Центавр-А образовался в результате столкновения двух галактик. Нет, это две галактики, но не обязательно пришедшие в столкновение. А вот Лебедь-А совершенно на него не похож. Здесь можно говорить только о столкновении. И. С. Шкловский, по мнению Минковского, недооценивает вероятность столкновения (о доводах В. А. Амбарцумяна, а также о своих прошлых сомнениях Минковский умалчивал).

И. С. Шкловский немедленно ответил. Он указал, что его возражения не были сняты Минковским. Лебедь-А может быть и двойной, и одиночной галактикой. Дело не столько в видимой структуре оптических объектов, сколько в структуре источника в радиодиапазоне. А она почти одинакова у галактик Лебедь-А и Центавр-А.

Характерным признаком этой структуры является двойственность радиоисточника. Исследования Дж. Болтона, а также А. Моффета и П. Малтби из радиообсерватории Калифорнийского технологического института, опубликованные в 1960—1961 гг., показали, что 38% радиоисточников являются двойными, а еще 12% — вытянутыми (т. е., возможно, двойными). Между тем большинство оптических объектов — одиночные, а не двойные галактики. К ним гипотеза столкновений вовсе не применима.

Окончательный удар гипотезе столкновений нанесли наблюдения Т. Метьюза и М. Шмидта из того же Калифорнийского технологического института, показавшие, что одиночные галактики, связанные с большинством радиоисточников, имеют такие же оптические спектры, как и Лебедь-А, с яркими эмиссионными линиями ионизованного кислорода. Структура их оказалась очень сложной: выбросы из ядер, диффузные струи, выходящие за пределы самих галактик, поглощающие массы вещества, наличие тонкой структуры ядра или оболочки — вот далеко не полный перечень внешних особенностей радиогалактик.

Итак, возбуждение и ионизация атомов в газовых «коронах» радиогалактик не были связаны со столкновениями в галактических масштабах. Гипотеза столкновений, сыграв известную положительную роль — в привлечении интереса астрономов, в стимулировании новых наблюдений и теоретических исследований, — окончательно канула в Лету.

А наблюдения поставляли теоретикам все новые и новые факты об аномальных галактиках...

Взаимодействующие галактики

Изучая мир галактик, астрономы давно уже обратили внимание на большое количество кратных галактик. В 1937 г. шведский астроном Э. Хольмберг составил каталог 132 групп кратных галактик. Однако исследованием их занялись значительно позже. В 1952 г. Ф. Цвикки с сотрудниками установил, что большинство галактик входит в скопления или группы галактик, тогда как число изолированных галактик сравнительно невелико. В 1955 г. В. А. Амбарцумян использовал каталог Хольмберга и результаты Цвикки для очень широких обобщений, касавшихся группового возникновения галактик, о чем мы уже рассказывали на стр. 308.

В 1956 г. Ф. Цвикки произвел новое исследование кратных галактик. Для этого он использовал фотографии, полученные с помощью крупнейшего в мире телескопа — 5-метрового рефлектора обсерватории Маунт Паломар. На многих фотографиях было ясно заметно, что в некоторых двойных и кратных галактиках компоненты соединены между собой перемычками из светящейся материи (рис. 69, вверху), а от некоторых галактик отходят «усы» или волокна (рис. 69, внизу). Цвикки считал, что эти образования порождены приливными взаимодействиями галактик, и даже пытался объяснить ими происхождение спиральных рукавов (стр. 256). Именно он употребил впервые термин «взаимодействующие галактики».

И все же честь подлинного открытия взаимодействующих галактик как особого явления природы принадлежит не Цвикки, а советскому астроному Б. А. Воронцову-Вельяминову. Заинтересовавшись работами Цвикки, Воронцов-Вельяминов решил подвергнуть тщательному осмотру и анализу Паломарский атлас неба.

Этот атлас состоял из фотографий, полученных в 1952 г. на светосильном 120-сантиметровом телескопе системы Шмидта. Астроному А. Вильсону удалось охватить этими фотографиями все северное небо и часть южного — до 33° южного склонения, а в общем $\frac{3}{4}$ всего неба. Каждый из 935 участков неба фотографировался дважды: в красных и синих лучах, чтобы можно было судить о цвете сфотографированных звезд, туманностей и галактик. Благодаря применению длительных экспозиций удалось заснять объекты до $20\text{--}21^m$. С негативов были сделаны отличные репродукции большого масштаба и разосланы ряду астрономических обсерваторий мира.

Один из экземпляров этого атласа и попал в руки Б. А. Воронцова-Вельяминова. Он и его сотрудники в течение трех лет внимательно осматривали все карты атласа и выделяли на них взаимодействующие галактики.

Работа над Паломарским атласом была нелегкая. Каждая карта имела формат 36×44 см, а всего их было 1870. По признанию самого Б. А. Воронцова-Вельяминова, изучение бесконечного многообразия галактик, которое представало взору астрономов, можно было сравнить с работой Антони Левенгука, рассматривавшего в микроскоп многообразии загадочных бактерий. К тому же исследование взаимодействующих галактик проходило одновременно с другой важной и трудной работой — составлением

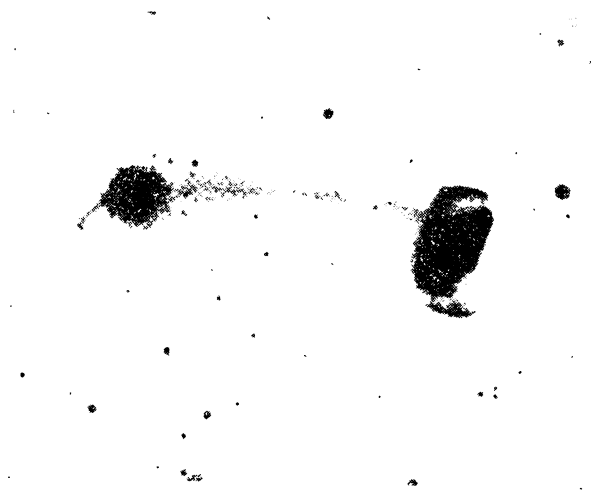


Рис. 69. Галактики с перемычками (по Ф. Цвикки).

Морфологического каталога галактик, включавшего 34 000 галактик ярче 15^m от северного полюса до склонения -33° .

И все же уже в 1957 г. были получены и опубликованы первые результаты, а 5 июня 1957 г. Б. А. Воронцов-Вельяминов сделал доклад о взаимодействующих галактиках на Шестом совещании по вопросам космогонии, проходившем в Москве. В этом докладе он обратил внимание на основные формы взаимодействия галактик, сопровождая изложение демонстрацией многочисленных фотографий.

Среди почти 350 изученных систем были отмечены следующие формы взаимодействия галактик:

а) части галактик, обращенные друг к другу, либо менее яркие, либо наблюдаются сильные искажения или даже нарушения спиральной структуры;

б) галактики соединены перемычками;

в) от одной или от обеих галактик отходят выступы, или хвосты, как правило, в сторону, противоположную другой галактике (реже — друг к другу);

г) галактики погружены в общую светящуюся среду («туман»);

д) формы галактик, обычно симметричные, искажены или асимметричны; впрочем, такое явление наблюдается и у одиночных галактик, но, это, может быть, является следствием когда-то бывшего взаимодействия.

Любопытно, что процент взаимодействующих галактик в скоплениях оказался не выше, чем среди изолированных галактик метagalacticкого поля.

Особенный интерес представляли перемычки и хвосты. Они отходили от самых различных частей галактики и нередко не были связаны с ее структурой, хотя часто являлись продолжением спиральных ветвей. Примером этого являлась галактика M 51 в Гончих Псах, где одна из ветвей соединяет основную галактику с ее спутником, у которого наблюдаются еще придатки (рис. 70). Интереснейшей парой галактик оказались «играющие мышки» (так назвал Воронцов-Вельяминов систему NGC 4676. От некоторых галактик отходили «антенны». Иногда несколько галактик выстраивалось в цепочку, соединенную общей перемычкой (рис. 71, 11).

В 1959 г. Б. А. Воронцов-Вельяминов издал свой «Каталог взаимодействующих галактик», в котором были координаты, описания и снимки 355 объектов. И подобно каталогам Мессье и Дрейера, галактики каталога Воронцова-

Вельяминова стали обозначать номерами с прибавлением букв VV (первых букв его двойной фамилии в латинской транскрипции).

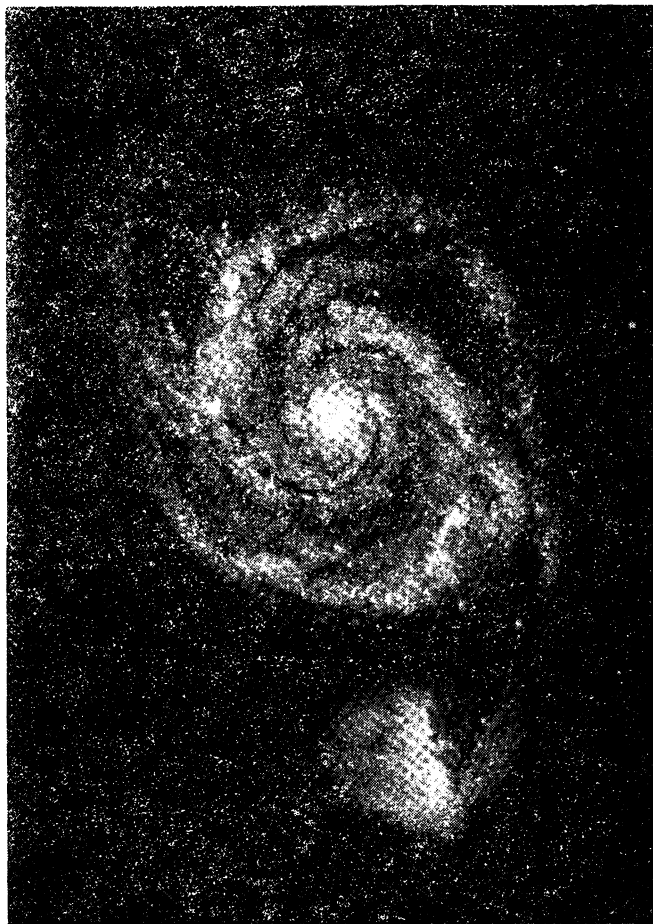


Рис. 70. Галактика М 51 в Гончих Псах со спутником; хорошо виден соединяющий их рукав.

Какие же выводы можно было сделать из этого открытия? Воронцов-Вельяминов отверг гипотезу Цвикки об образовании взаимодействующих систем галактик в результате

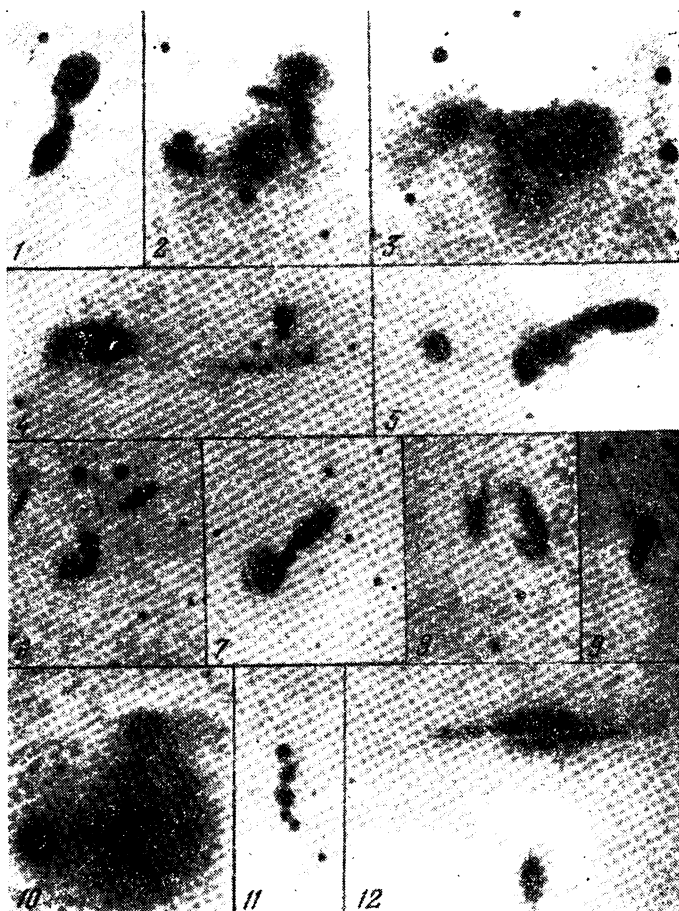


Рис. 71. Взаимодействующие галактики (по Б. А. Воронцову-Вельяминову).

Все снимки — по Паломарскому атласу неба. Масштаб: $1 \text{ мм} = 4''$.

1 — пара галактик с перемычкой и голубым сгустком в ней, 2 — семейство галактик в общей оболочке, 3 — тесное семейство галактик в очень плотной оболочке, 4 — галактика, соединенная спиральной ветвью со спутником и перемычкой — с неправильной галактикой, 5 — три взаимопроникающие галактики, 6 — галактики с двойной перемычкой, 7 — соприкасающиеся галактики, 8 — редкий случай «притяжения» спиральных ветвей, 9 — галактики, напоминающие сегнерово колесо, 10 — галактики с двойной перемычкой, похожей на трансмиссию, 11 — цепочка галактик с общей перемычкой, 12 — галактика NGC 5403 с наклонным слоем диффузной материи.

случайных встреч и захвата. Многообразие обнаруженных им форм никак не объяснялось этой гипотезой. Особенно не укладывались в схему захвата трех-, четырех- и пятикратные галактики, соединенные общими перемычками или погруженные в общий туман *).

Исходя из анализа форм взаимодействующих и взаимопроникающих галактик, а также их лучевых скоростей, Воронцов-Вельяминов пришел к выводу, что они должны были возникнуть совместно. К тому же выводу, как мы знаем, пришел и В. А. Амбарцумян. И оба ученых, еще пять лет назад бывшие непримиримыми противниками в споре о звездных ассоциациях, протянули друг другу руки и объединили свои усилия для дальнейшего исследования проблемы группового происхождения галактик.

Впрочем, это не значит, что они стали работать вместе, как Лебединский с Гуревичем. Нет, каждый из них работал независимо, имея себе в помощь большой коллектив сотрудников. И методы работы у них были разные. Воронцов-Вельяминов основное внимание уделял морфологии галактик, формам их взаимодействия. Амбарцумяна больше интересовали скорости галактик в кратных системах — он стремился доказать, что они расходятся, как звезды в ассоциациях, т. е. что раньше они были друг к другу ближе. Затем он заинтересовался такими явлениями, как струи и выбросы из ядер галактик, подобно наблюдаемому в NGC 4486 (Цева-А). Открытие радиогалактик навело, как мы уже знаем, В. А. Амбарцумяна на мысль об активных, взрывоподобных процессах в их ядрах, и дальнейшие исследования подтвердили эту идею. Но вскоре обнаружились еще и другие факты, были открыты новые формы аномальных галактик. О них-то нам и предстоит рассказать.

Галактики Сейферта, Маркаряна и другие

В 1943 г. американский астроном Карл Сейферт опубликовал список из 12 галактик, отобранных из множества звездных систем по следующим признакам:

1. Спиральная галактика имеет яркое звездообразное ядро (рис. 72).

*) Несмотря на все несоответствие наблюдений гипотезе захвата и столкновений галактик, Цвикки даже в 1971 г. продолжал на ней настаивать.

2. Излучение ядра составляет заметную долю излучения галактики.

3. Ядро имеет спектр с широкими эмиссионными линиями, соответствующими высоким степеням возбуждения излучающих атомов.

Такие свойства показали К. Сейферту необычными. Как известно, спектры обычных галактик представляют собой спектры поглощения, образованные сложением



Рис. 72. Сейфертовская галактика NGC 1275 — радиисточник Персей-А.

спектров звезд, входящих в галактику. Правда, в состав галактики входят газовые туманности, диффузные и планетарные, а также новые и сверхновые звезды, которые дают эмиссионные спектры. Но все они, как правило, рассредоточены вдоль спиральных рукавов и никогда не концентрируются в ядре галактики.

Обнаружение эмиссионных линий в ядрах выделенных им галактик заставило К. Сейферта предположить, что это — какие-то объекты нового типа, неизвестного ранее. Увы, на его работу не обратили должного внимания и вспомнили о ней лишь 15 лет спустя.

А галактики Сейферта заслуживали самого пристального внимания. Из восьми наиболее типичных галактик этого типа семь имели в спектре узкие запрещенные линии азота и кислорода (нейтрального и ионизованного), которые служат признаком высокой температуры. У восьмой галактики, NGC 1068, запрещенные линии были шире, хотя и уступали по ширине наиболее ярким эмиссионным линиям, принадлежавшим водороду.

Аномальная ширина водородных линий говорила о том, что газ в ядрах сейфертовских галактик движется (скорее всего, расширяется) со скоростями в несколько тысяч километров в секунду.

Прошло 13 лет. В марте 1956 г. мексиканский астроном Г. Аро из обсерватории в Тонанцинтла сообщил на собрании Американского астрономического общества об открытии им значительного числа галактик с аномальным усилением сине-фиолетовой части спектра. У некоторых из них была замечена сильная концентрация света к центру изображения и ряд эмиссионных линий в спектре (в том числе знаменитый дублет ионизованного кислорода у 3727 Å). Чтобы определить природу этих «голубых галактик», Гвидо Мюнч получил их фотографии и спектры на 2,5-метровом и 5-метровом рефлекторах обсерваторий Маунт Вилсон и Маунт Паломар. Среди «голубых галактик» оказались представители почти всех классов по классификации Хаббла, кроме эллиптических: S0, Sa, Sb, Sc и I. Однако они были меньше и слабее обычных галактик почти на 3 звездных величины. Три измеренные Мюнчем «голубые галактики» имели в диаметре 3000—8000 световых лет против 50 000 световых лет у соседки двух из них — галактики NGC 3994 в Большой Медведице (рис. 73). Ядра у галактик Аро выделялись плохо, но их поверхностная яркость была высока. В их центральных частях выделялись яркие и широкие области ионизованного водорода H II. Фиолетовый цвет галактик Аро мог быть объяснен, по Мюнчу, свечением иона кислорода в линии 3727 Å и большого числа молодых горячих голубых звезд. И действительно, вскоре В. Бааде разложил одну из «голубых галактик» на звезды (это была NGC 1569) и обнаружил в центральной части 10—20 звезд с абсолютной звездной величиной -10^m ! Каждая такая звезда излучала в миллион раз больше энергии, чем Солнце. Именно они своим излучением возбуждали свечение газа и ионизовали его. Но поскольку в «голубых галактиках» много молодых звезд, не значило ли это, что они сами молоды?

Г. Аро вспомнил о работе Сейферта и сравнил «свои» галактики с сейфертовскими. Сходство было во многом, но галактики Сейферта были заметно краснее «голубых».

Работа Аро разорвала «завесу молчания» вокруг работы Сейферта *). В следующем году, выступая на Шестом совещании по вопросам космогонии, Б. А. Воронцов-Вельяминов именно с нее и начал свое выступление. Он обратил внимание на то, что одна из сейфертовских галактик,

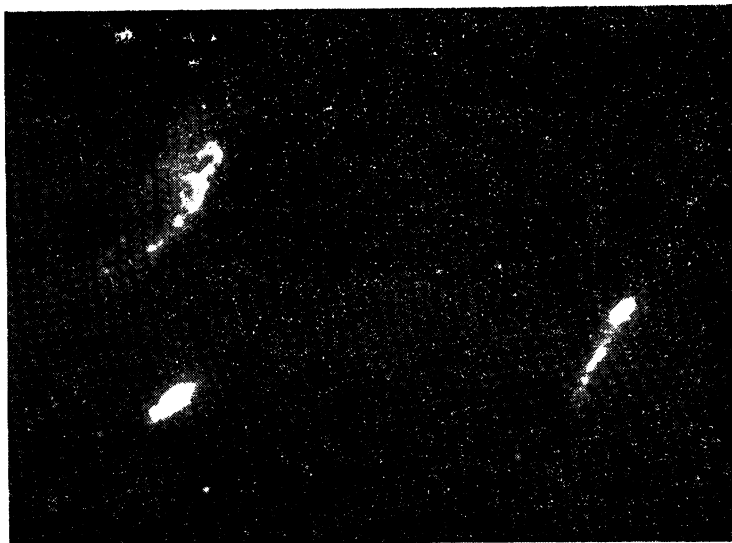


Рис. 73. Галактика Аро NGC 3991 (рядом NGC 3994).

NGC 1275, оказалась радиогалактикой (это хорошо известный нам радиоисточник Персей-А, рис. 72). Среди других сейфертовских галактик она ничем особенным не выделялась. Ширина линий и скорость истечения газа в ядре у нее была «средняя» (для данного класса галактик, разумеется), 1500 км/сек, все другие параметры — тоже. В чем же было дело? Воронцов-Вельяминов обратился к «голубым галактикам» Аро. Выяснилось, что две из них также отожде-

*) Впрочем, о галактиках Сейферта вспомнил тогда не только Аро. О них говорится в монографии И. С. Шкловского «Космическое радиоизлучение», вышедшей из печати в том же 1956 г.

связываются с радионсточниками, а возможно, что и еще иная. Связь между всеми тремя видами объектов была очевидна, но построить четкую картину этой связи не удавалось.

В 1958 г. Джеффри Бербидж тоже «вспомнил» о галактиках Сейферта и Аро. Изучая вопрос об относительном содержании гелия в нашей Галактике, он пришел к выводу, что превращение лишь 10% водорода в гелий дало бы энергию около 10^{62} эрг. Галактика типа М 31 (и нашей Галактики) излучает $5 \cdot 10^{43}$ эрг/сек, т. е. при такой мощности излучения вся выделившаяся энергия была бы испущена за 10^{11} лет. Но наша Галактика существует в 10 раз меньше время. Куда же девалась энергия? На поддержание движения газовых масс? На это надо очень мало энергии — на несколько порядков меньше искомым потерь. Быть может, раньше наша Галактика излучала сильнее? Но тогда она имела бы абсолютную звездную величину -25^m , а таких галактик не бывает. И Бербидж выдвинул гипотезу, что на начальной стадии развития галактики аккумулируют ядерную энергию в виде кинетической и магнитной энергии. Первая была потеряна за счет выбросов масс газа (тут Дж. Бербидж солидаризировался с гипотезой В. А. Амбарцумяна) или постепенного истечения газа с большими скоростями (вот где пригодились галактики Сейферта!). Вторая могла рассеяться в виде нетеплового (синхротронного) излучения. Не наблюдаем ли мы его в случае «голубых галактик» Аро? Надо провести наблюдения распределения энергии в их спектре и поляризации излучения: это дало бы проверку гипотезы.

Такую проверку попытались сделать тогда же, в 1958 г., астрономы У. Хилтнер и Б. Ириарте, но ни у одной из восьми исследованных ими галактик Аро признаков поляризации обнаружено не было.

Прошло еще пять лет. В 1963 г. Б. Е. Маркарян предпринял на Бюраканской обсерватории фотографирование спектров далеких галактик с помощью метрового телескопа Шмидта с объективной призмой. Это одна из крупнейших в мире объективных призм, свыше метра в диаметре, на первый взгляд даже непохожая на призму, а скорее на громадную круглую линзу. Поставленная на пути лучей, падающих на коррекционную пластинку телескопа Шмидта, а затем на главное зеркало, она давала на фотопластинке спектры всех звезд и галактик, попадавших в поле зрения телескопа, одновременно. Правда, дисперсия (масштаб по

оси длин волн) у этих спектров была низкая, но представление о распределении энергии в спектре они давали.

Маркарян обратил внимание на то, что у 41 галактики типов E, S0, Sa и Sb спектральные классы гораздо более ранние, чем можно было ожидать, судя по их показателям цвета. Иначе говоря, в спектрах этих галактик имелся ультрафиолетовый избыток. Но к краям галактик наблюдалось заметное покраснение.

Б. Е. Маркарян проанализировал это явление. Может быть, причиной ультрафиолетового избытка в ядрах галактик являются эмиссионные линии, т. е. свечение горячих масс газа? Нет, они даже в сейфертовских галактиках дают только 5—15% общего излучения их ядер. Излучение голубых гигантов? Но расчет показывал, что для этого их должно было быть непропорционально много. Так, может быть, это и есть излучение нетепловой природы, связанное с активностью ядер галактик и процессами формирования молодых звезд?

В 1967—1973 гг. Б. Е. Маркарян опубликовал шесть списков галактик с ультрафиолетовым континуумом в спектре, содержавших в общей сложности 600 объектов. Их стали изучать. Были получены их спектры с высокой дисперсией, исследованы морфологические формы. Примерно половина галактик Маркаряна имела резкие спектры (тип s), остальные — диффузные размытые (тип d). Последние, по мнению Маркаряна, могли быть объяснены излучением горячих гигантов, но в отношении первых он продолжал придерживаться гипотезы о нетепловом излучении. Около $\frac{2}{3}$ галактик Маркаряна имели в спектре эмиссионные линии. И, наконец, примерно 10% из них оказались новыми сейфертовскими галактиками.

Галактики Маркаряна стали обозначать номерами его каталога с прибавлением первой половины его фамилии (полатыни): Mark 79, Mark 114 и т. д. Научные заслуги Б. Е. Маркаряна были оценены по достоинству: в 1965 г. он был избран членом-корреспондентом, а в 1971 г. академиком Академии наук Армянской ССР.

А между тем открытия новых типов галактик продолжались. В 1964 г. Ф. Цвикки объявил об открытии богатого класса компактных галактик, отличавшихся тем, что при малой площади они имели довольно большую поверхностную яркость. Впрочем, «большая» — это в данном случае понятие относительное. Представим себе звезду 4-й звездной величины и «размажем» ее на площадь лунного диска.

Мы получим н и ж н и й п р е д е л яркости компактных галактик. Чуть слабее этого предела галактика NGC 205, известный спутник галактики М 31 в Андромеде (рис. 46). Поэтому она не была отнесена Цвикки к числу компактных.

В первом списке Цвикки было 210 объектов, но потом их число достигло 3000. Цвикки использовал фотографии, полученные Г. Аро и В. Лейтеном на обсерватории в Топицинтла (Мексика), а также им самим на обсерватории Маунт Паломар с уже известным нам 120-сантиметровым телескопом Шмидта.

С открытием компактных галактик связана неприятная история, характерная для американских нравов. Еще весной 1964 г. Ф. Цвикки направил статью о своем открытии в ведущий американский астрофизический журнал «Astrophysical Journal». Но ее там почему-то не приняли к печати, и автору пришлось опубликовать сообщения о компактных галактиках в научных журналах Советского Союза, Польши, Франции и ГДР. А спустя год другой американский астроном Алан Сэндидж опубликовал в «Astrophysical Journal» сообщение об открытии им к в а з и з в е з д н ы х г а л а к т и к (почти звездообразных). Среди квазизвездных галактик Сэндиджа было несколько компактных галактик Цвикки. Это обстоятельство, наряду с тем, что журнал, отклонив его статью, поместил более позднюю статью Сэндиджа, дало Цвикки основание обвинить Сэндиджа в плагиате, похищении идей и других смертных грехах.

Но научный мир прошел мимо этой скандальной истории, приняв и компактные галактики Цвикки, и квазизвездные галактики Сэндиджа, стараясь установить взаимосвязи между ними, а также их связи с другими объектами.

Компактные галактики оказались интереснейшими объектами. Спектроскопические исследования их, проведенные У. Сарджентом и Л. Сирлем на 5-метровом паломарском телескопе, дополненные прямыми фотографиями и фотометрическими измерениями, показали большое разнообразие их форм и свойств. Некоторые из них принадлежали к сейфертовскому типу, другие имели резкие линии излучения, третьи, наоборот, — линии поглощения, четвертые — и те и другие. Абсолютная звездная величина их колебалась в пределах от -12^m до -23^m . Некоторые из них — двойные и кратные, другие имеют «хвосты», «выбросы», «петли» и даже кольцеобразные структуры. Но, пожалуй, самым интересным было открытие почти полной идентичности спектральных свойств двух слабых компактных

галактик с эмиссионными линиями и областей H II в других галактиках. Наличие гигантских облаков водорода в компактных галактиках доказывает, что это — весьма молодые образования.

В том же 1964 г., почти одновременно с компактными галактиками Цвикки, было сделано еще одно открытие: американские астрономы Т. Метьюз, У. Морган и М. Шмидт открыли так называемые N-галактики.

Собственно говоря, термин «N-галактики» был введен У. Морганом в его классификацию галактик еще в 1958 г. Тогда буквой N (от слова «nucleus» — ядро) были обозначены системы с ярким маленьким ядром и значительно более слабым фоном. И, как это часто бывало, никто не обратил внимания на эту немногочисленную группу галактик.

Но в 1964 г. выяснилось, что N-галактики обладают рядом интересных свойств. Обычно это яркие компактные объекты с туманной красноватой оболочкой. В отличие от голубых компактных галактик Цвикки, все N-галактики (их тогда было известно 16) являются довольно мощными радиоисточниками. Их радиоизлучение ничем не отличается от излучения других внегалактических источников — и спектры, и мощности у них примерно те же. Как и радиогалактики, в радиодиапазоне N-галактики — двойные. По абсолютной светимости они превосходят ядра сейфертовских галактик, имея -21^m против $-18,5^m$ у последних и мощность излучения соответственно $5 \cdot 10^{43}$ эрг/сек против $5 \cdot 10^{42}$ эрг/сек.

Самой интересной особенностью N-галактик является явно нетепловой характер их оптического излучения. Об этом говорит хотя бы наличие поляризации, которая, по измерениям ленинградских астрономов В. А. Домбровского и В. А. Гаген-Торпа, составляет от 2,5 до 6% и растет с длиной волны. Для ядер сейфертовских галактик поляризация оптического излучения не превосходит 2,5%. При этом у сейфертовских галактик с переходом к периферии поляризация уменьшается, а значит, растет вклад обычного, теплового излучения звезд. У N-галактик, по наблюдениям Сэндидажа, нетепловое излучение связано с их ядрами, сами же галактики — обычные эллиптические звездные системы.

В 1967 г. американский астроном Дж. Оук обнаружил, что блеск одной из N-галактик, ЗС 371, изменился за два года на 2^m . Кроме того, наблюдались короткопериодические

изменения блеска этой N-галактики с периодом в несколько суток. Позже аналогичные изменения были отмечены и у других N-галактик. В спектрах некоторых N-галактик были обнаружены широкие линии излучения атомов и ионов углерода, магния, кислорода, в спектрах других, наоборот, никаких линий обнаружено не было.

Как же можно было объяснить весь этот комплекс фактов? Разумеется, тут же посыпались и гипотезы, но мы пока не будем их здесь приводить: они были очень скоро-спелыми и не прошли проверку временем. Лучше обратим внимание на другое.

За какие-нибудь десять лет ученые открыли или начали пристально изучать целый комплекс неизвестных ранее видов аномальных галактик. Перед нами прошли вереницей радиогалактики, взаимодействующие галактики, галактики Сейферта, Аро, Маркаряна, компактные галактики Цвикки, квазизвездные галактики и, наконец, N-галактики. Все эти классы галактик не изолированы друг от друга, а перекрываются. Так, многие из галактик Маркаряна и Аро оказались сейфертовскими. Многие из компактных галактик Цвикки являются одновременно квазизвездными, или галактиками Маркаряна и Аро. N-галактики — частный случай радиогалактик. Очевидно, что признаки, по которым отбирались галактики Сейфертом, Аро, Маркаряном, Цвикки, Сэндиджем и Морганом, могут (но не обязательно) сосуществовать в одном объекте.

Впрочем, мы должны извиниться перед читателем: наш список пекулярных объектов неполон. Мы намеренно еще не познакомили вас с двумя самыми интересными видами этих объектов, изучение которых внесло настоящую революцию в наши представления о внегалактических системах. Это — **в з р ы в а ю щ и е с я г а л а к т и к и** и **к в а з а р ы**. Но ведь самое интересное всегда приберегают к концу.

Взрыв в галактике М 82

Неправильная галактика М 82, небольшой спутник красивой спиральной галактики М 81 в Большой Медведице, была известна давно, еще со времен Мессье. И никто за 180 лет не обращал на нее никакого внимания. Уже были открыты галактики Сейферта и Аро, шли споры о природе радиогалактик, а галактика М 82 все еще ждала своего часа. И наконец дождалась.

В 1961 г. американский астрофизик К. Р. Линдс, работавший в Национальной радиоастрономической обсерватории США в Грин Бэнк (Западная Вирджиния), пытался отождествить с каким-нибудь оптическим объектом только что открытый им слабый радиоисточник ЗС 231, находившийся неподалеку от галактики М 81. Сперва он решил, что источником является сама М 81, но уточнение координат источника привело астронома к ее соседке — галактике М 82. Линдс стал просматривать ее фотографии. На снимке 1910 г., полученном с 1,5-метровым рефлектором обсерватории Маунт Вилсон, были видны обширные пылевые «разводья» со слабой волокнистой структурой, простирающиеся вверх и вниз от веретенообразного «тела» галактики, но звезды не различались. На снимке 1949 г. с 5-метровым рефлектором обсерватории Маунт Паломар волокнистая структура галактики выглядела более отчетливой.

Заинтересовавшийся открытием Линдса Алан Сэндидж в марте 1962 г. снова сфотографировал галактику М 82 на 5-метровом телескопе, но с узкополосным фильтром, пропускавшим только излучение водорода. К удивлению ученого, галактика М 82 предстала перед ним в совсем ином виде. Казавшиеся ранее незаметными пучки волокон превратились в обширные запутанные структуры, явно принадлежавшие водороду и протянувшиеся на 10 000 световых лет вверх и вниз от диска галактики (рис. 74).

Пока Сэндидж фотографировал эту галактику на крупнейшем в мире телескопе, Линдс использовал второй телескоп в мире, 3-метровый рефлектор Ликской обсерватории, для изучения ее спектра. Поставив щель вдоль оси волокон, он получил яркие эмиссионные линии водорода, а также ионов кислорода, серы и азота. Но самое главное было то, что эти линии были смещены относительно их нормальных (лабораторных) положений, и притом в р а з н ы е с т о р о н ы: в северной части галактики к красному концу, а в южной — к фиолетовому. Это означало, что газ либо движется в разные стороны, либо, наоборот, сжимается. Чтобы разрешить этот вопрос, нужно было установить ориентировку диска галактики относительно луча зрения. Наклон плоскости диска удалось определить: $8^{\circ}23'$. Но какой край ближе к нам: северный или южный? Возникла задача, с которой мы уже встречались (стр. 254). Линдс и Сэндидж решили ее, используя расположение полос темной материи на снимках галактики. К Земле был обращен се-

верный край диска, а значит, газовые массы разлетались от диска в разные стороны (рис. 75, вверху).

Вскоре было установлено и другое обстоятельство. Скорости разлета возрастали с удалением от диска. Что это могло означать? Неужели какая-то сила разгоняет массы газа по мере их удаления? Нет, все обстояло гораздо проще. Поскольку скорость разлета была прямо

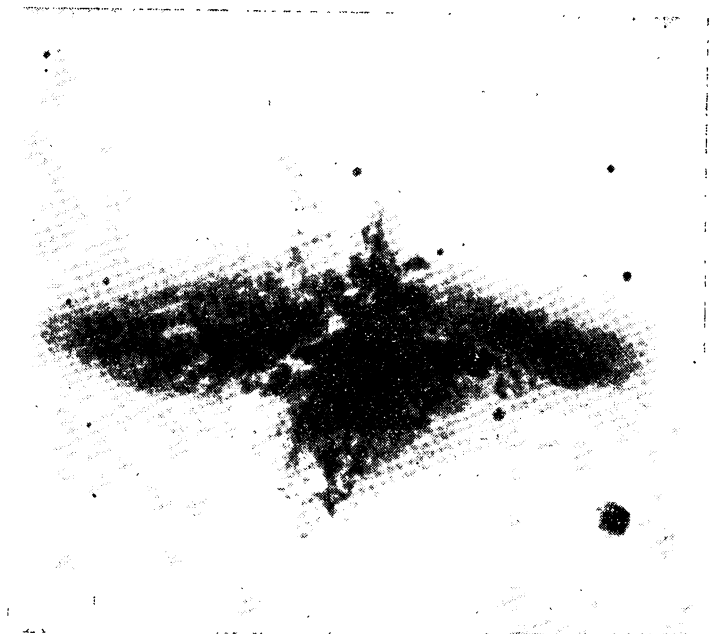


Рис. 74. Галактика М 82 в лучах водорода.

пропорциональна расстоянию, получалась та же картина, что и в случае разбегания галактик: можно было обратиться к задаче и принять, что пройденный путь пропорционален скорости. Это приводило к выводу, что время разлета для всех волокон одно и то же, т. е. разлет газа начался в один и тот же момент.

Зная скорость по лучу зрения и угол наклона плоскости диска, Линдс и Сэндидж смогли определить полную скорость волокон. На концах волокнистой структуры скорость достигала 1000 км/сек. Она в 7 раз превышала крити-

ческую скорость на данном расстоянии, а это означало, что концы волокон должны будут навсегда покинуть галактику.

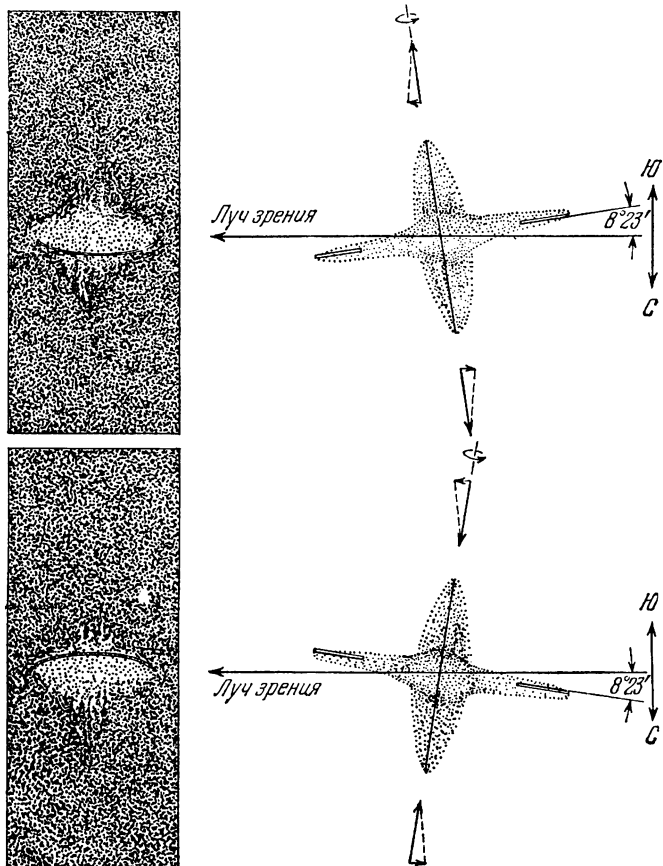


Рис. 75. Два варианта ориентировки галактики М 82. Верхний вариант соответствует действительности.

Поскольку расстояние от концов волокон до диска составляло около 10 000 световых лет, а скорость их удаления была в 300 раз меньше скорости света, можно было без труда рассчитать, что выброс произошел около 3 миллионов лет назад. Если же учесть, что движение в поле тяготения галактики происходит с торможением, т. е. раньше скорость была больше, срок взрыва приближался

к нашей эпохе и отстоял от нее лишь на полтора миллиона лет.

Линдс и Сэндидж сделали некоторые расчеты, связанные с энергетикой взрыва. Наблюдаемый поток излучения в красной линии водорода H_{α} (принимая расстояние до галактики в 10 миллионов световых лет) соответствует полной мощности излучения $2 \cdot 10^{40}$ эрг/сек. Ионная плотность в волокнах, оцененная по излучению единицы объема, составляет 10 протонов в 1 см^3 . Это приводит к оценке верхнего предела массы расширяющегося газа в $5,6 \cdot 10^6 M_{\odot}$, а отсюда уже нетрудно получить и верхний предел кинетической энергии движущегося газа: $2,4 \cdot 10^{55}$ эрг.

Но это была еще не вся энергия взрыва. Значительная часть ее должна была перейти в энергию синхротронного излучения. А в том, что такое излучение испускается галактикой М 82, убеждал ее радиоспектр, очень похожий на спектр Крабовидной туманности. Вскоре было получено и другое доказательство: методом составных фотографий (наложением друг на друга нескольких снимков для усиления контрастности изображения) удалось обнаружить тонкую бахрому из голубых волокон на северной и южной сторонах галактики, которые давали не только линейчатый, но и непрерывный спектр. Окончательное доказательство наличия синхротронного излучения было получено в феврале 1964 г., когда фотографирование галактики на 5-метровом рефлекторе через поляроиды показало, что свет, излучаемый волокнами, сильно поляризован. А это, как мы знаем, явный признак синхротронного излучения. По интенсивности этого излучения в оптическом и радиодиапазоне Линдс и Сэндидж нашли его полную энергию: $9 \cdot 10^{55}$ эрг (считая, что за полтора миллиона лет оно не менялось).

Но в синхротронное излучение переходит не более 1% общей энергии взрыва. Значит, последняя составляла около 10^{58} эрг. Для того чтобы яснее представить себе, что это такое, сравним энергии космических взрывов разного масштаба и сильнейших катастроф на Земле (в эргах):

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| Взрыв атомной бомбы над Хиросимой | 10^{21} |
| Взрыв вулкана Кракатау | 10^{24} |
| Вспышка на Солнце (сильная) | 10^{32} |
| Взрыв новой звезды | 10^{46} |
| Взрыв сверхновой | 10^{51} |
| Взрыв в галактике М 82 | 10^{58} |
| Взрыв радиогалактики Лебедь А | 10^{62} |

Итак, взрыв в галактике М 82 был эквивалентен одновременной вспышке 10 миллионов сверхновых, притом самых мощных. Что же явилось причиной этого взрыва? Что является причиной взрыва в радиогалактиках?

Термоядерные реакции? Увы, этот процесс, несмотря на кажущуюся его грозную силу, в данном случае совершенно неэффективен, поскольку на один грамм водорода, превращаемого в гелий, выделяется «только» $6 \cdot 10^{18}$ эрг энергии. Значит, для выделения 10^{62} эрг потребовалось бы более 10^{43} г массы, или 10^{10} солнечных масс. Но это — масса целой галактики! А ведь надо помнить, что не все ее вещество состоит из водорода, что этот водород не может сразу весь превратиться в гелий и, наконец, что не более 1% энергии, выделившейся при взрыве, перейдет в энергию радиоволн.

Что таится в ядрах галактик?

Из всех ученых, внимательно следивших за результатами исследования галактики М 82 и других взрывающихся галактик (Лебедь А, Дева А и др.), больше всех, пожалуй, радовался В. А. Амбарцумян. Еще бы: получено новое, и притом очень важное, наблюдательное подтверждение его взглядов, высказывавшихся им многократно начиная с 1955 г. Сначала это была только гипотеза о том, что в случае галактики Лебедь А мы имеем взрыв, а не столкновение галактик; гипотеза, высказанная в противовес общепринятой в то время гипотезе столкновения. Затем начались обобщения других наблюдательных фактов: неустойчивости систем кратных галактик, наличия взаимодействующих галактик, которые, по-видимому, образовались совместно. Дальше В. А. Амбарцумян начал развивать идею о взрывоподобных процессах в ядрах галактик.

Первое широкое обобщение данных наблюдений, положенных в основу этой идеи, В. А. Амбарцумян сделал в своем докладе на XI Сольвейской конференции в Брюсселе в июне 1958 г. Еще никто не знал о взрыве в галактике М 82, а Амбарцумян уже обратил на нее внимание, хотя и с другой точки зрения: она принадлежала к группе из четырех галактик с М 81 во главе, но, в отличие от трех остальных, удалялась от центра этой группы со скоростью 400 км/сек. Подсчет показал, что притяжение М 81 и двух других галактик группы не сможет удержать М 82 и она неизбежно должна эту группу покинуть. Нашлись и другие системы, в которых одна или две галактики имели скорости, достаточ-

ные для ухода из системы. Такие скорости, по мнению В. А. Амбарцумяна, они получили при своем образовании. Но за счет чего?

Анализ всей совокупности фактов, имевшихся к тому времени, привел В. А. Амбарцумяна к следующему выводу:

«Ядра могут делиться, а также выбрасывать спиральные рукава и радиальные струи, содержащие в себе сгущения. Однако спонтанное деление звездной системы, состоящей из одних лишь звезд, кажется динамически невозможным.

По-видимому, мы должны отказаться от мысли, что ядра галактик состоят только из обычных звезд. Мы должны допустить, что эти ядра содержат весьма массивные тела, которые не только способны разделиться на части, удаляющиеся друг от друга с большими скоростями, но могут также выбрасывать наружу сгустки материи, имеющие массы, во много раз превосходящие массу Солнца.

«Мы должны допустить, — говорил далее В. А. Амбарцумян, — что ядра могут содержать значительные массы дозвездного вещества».

Итак, опять — загадочное дозвездное вещество с совершенно неизвестными нам свойствами и, быть может, с неизвестными источниками энергии. Еще в своем докладе на II съезде Всесоюзного астрономо-геодезического общества в Ленинграде в январе 1955 г. В. А. Амбарцумян (а вслед за ним Н. А. Козырев) высказался в пользу существования новых источников энергии звезд. Но за прошедшие годы эти источники найдены не были.

При обсуждении доклада Амбарцумяна на Сольвейской конференции английский астроном Томас Голд выдвинул идею, что причиной расширения звездных ассоциаций мог быть грандиозный ядерный взрыв, происшедший в результате сильного сжатия масс газа, превышающих $10\,000 M_{\odot}$. При таком сжатии центральная плотность и давление могут достигнуть значений, достаточных для освобождения больших количеств ядерной энергии. Голд поставил вопрос: не могут ли происходить аналогичным образом взрывы еще больших масштабов, что привело бы к построениям, близким к тем, которые делал В. А. Амбарцумян? Идеи Амбарцумяна и гипотеза Голда о ядерном взрыве в результате сжатия большой массы (гипотеза коллапса антиколлапса) привлекли внимание многих других ученых: Г. Бонди, У. Мак-Кри, Я. Оорта, Ф. Хойла. Оорт в связи с этим обратил внимание на открытие астрономом обсерватории Маунт Паломар Д. Остерброком плотных

газовых ядер в эллиптических галактиках с массами порядка $10^6 M_{\odot}$. Бонди сообщил, что даже начал делать кое-какие расчеты модели Голда, Мак-Кри с ней соглашался, Хойл сомневался.

А В. А. Амбарцумян продолжал развивать свои идеи, приводя все новые подкрепляющие их факты. В 1961 г. он обратил внимание на то, что из центральной части нашей Галактики происходит истечение нейтрального водорода — это явление было обнаружено группой Я. Оорта в Голландии по радиоизлучению на волне 21 см. Такое же истечение газов из ядра наблюдалось в галактике М 31 Г. Мюнчем на обсерватории Маунт Паломар по расширению линии 3727 Å. Но в обоих случаях истечение проходит медленно, по одной массе Солнца в год.

Другое дело — сейфертовские галактики. Здесь налицо мощные потоки газа, выбрасывающиеся со скоростями в тысячи километров в секунду. То же можно сказать и о части «голубых галактик» Аро, у которых имеются широкие эмиссионные линии. Радиогалактика Персей А (NGC 1275) оказалась тоже сейфертовской, и этот пример не единственный. Все данные о радиогалактиках подтверждают идею о космогонической активности ядер галактик.

В 1964 г. В. А. Амбарцумян предложил следующую классификацию галактик по степени развития их ядер:

1) Галактики без заметных ядер или сгущений в центре (многие неправильные и карликовые эллиптические галактики типа скопления в Скульпторе).

2) Галактики со спокойными ядрами низкой светимости (наша Галактика, М 31, М 33 и др.).

3) Галактики со спокойными ядрами высокой светимости, с наличием эмиссионных линий; ядро в несколько раз слабее галактики в целом (NGC 4303, NGC 3162).

4) Сейфертовские и им подобные галактики с очень яркими ядрами, светимость которых составляет значительную часть светимости самой галактики; широкие эмиссионные линии указывают на расширение газовых масс.

5) Компактные галактики Цвикки и квазизвездные галактики, где светимость в целом концентрируется в ядре.

Анализ этой классификации привел В. А. Амбарцумяна к выводу, что ядра галактик состоят, вообще говоря, из трех компонент: звездного населения, газа и сверхмассивного тела, которое может быть или в эруптивном (вспышечном) состоянии, как в случае квазизвездных галактик, или в возбужденном, активном состоянии, как

у сейфертовских галактик, или в состоянии слабой активности, как в галактиках классов 2 и 3. Открытие галактик Маркаряна, принадлежавших в частности и к этим двум классам, В. А. Амбарцумян расценил как подтверждение его заключения.

Короче говоря, получалось, что по мере накопления новых фактов о нестационарных явлениях в галактиках гипотеза В. А. Амбарцумяна вытеснялась, как губка, наполняясь дополнительными новыми аргументами. Но с теоретической точки зрения она развивалась слабо. О том, что было сделано в этом направлении В. А. Амбарцумяном, Г. С. Саакяном и их сотрудниками, мы уже рассказывали (стр. 221). К каким результатам привели эти исследования, мы тоже знаем. Построить теорию сверхмассивных тел в ядрах галактик, удовлетворяющих гипотезе Амбарцумяна, армянским теоретикам не удалось. А впрочем, не им одним. 1963 год поставил перед астрономами и физиками проблему гораздо более трудную. Были открыты небесные тела принципиально нового типа. Это были к в а з а р ы.

Открытие «радиозвезд»

История открытия квазаров настолько интересна и увлекательна, что мы изложим ее здесь со всеми подробностями.

Как мы уже знаем, в 1946 г. Хей, Филипс и Парсонс в Англии открыли первый дискретный источник радиоизлучения в Лебеде. В 1948 г. в Англии и в Австралии были обнаружены другие дискретные источники. Число их постепенно росло, и понадобилась их каталогизация. Первый каталог радионисточников, составленный австралийскими астрономами, был многочисленным: в нем значилось всего 18 объектов. Полнее был Первый Кембриджский каталог, опубликованный М. Райлом, Ф. Смитом и Б. Элсмором в 1950 г.: в нем было уже 50 источников. Он получил условное обозначение IC. Вскоре австралиец Б. Миллс опубликовал каталог с 77 радионисточниками.

Тогда в Кембридже (Англия) был предпринят систематический обзор всего неба, доступного наблюдениям на этой широте, с помощью большого радиоинтерферометра, имевшего форму прямоугольника 580×52 м и позволявшего выделять на небе объекты с угловыми размерами меньше $20''$ ($\frac{1}{3}$ диска Луны). Работа была проведена под руководством М. Райла в 1953—1954 гг., а в 1955 г. был опубликован

Второй Кембриджский каталог (2С), насчитывавший 1936 источников.

Но, увы, — многие из этих источников оказались фиктивными. Дело в том, что, в отличие от оптического телескопа, радиотелескоп фиксирует излучение не только от той точки или области, куда он направлен, но и от некоторых соседних областей, куда смотрят боковые лепестки диаграммы направленности радиотелескопа. Если там есть радиоисточники, то они будут зафиксированы, как будто они находятся в центральной области. Кроме того, при технике того времени было трудно отличить один сильный источник от нескольких близких слабых. В результате из почти 2000 объектов каталога 2С только 500 оказались реальными.

Нужен был новый обзор неба, и кембриджские радиоастрономы решили провести его на более короткой волне (это позволяло уменьшить влияние боковых лепестков). Радиоинтерферометр был переделан и усовершенствован, на что потребовалось полгода. Третий Кембриджский каталог радиоисточников (3С) был готов к 1957 г. и опубликован в 1959 г. В 1962 г. он был пересмотрен. В него вошло 450 радиоисточников. Одновременно или позже в Австралии и в США были составлены другие каталоги, охватившие, в частности, южное небо.

Дальше началась кропотливая работа по отождествлению обнаруженных радиоисточников. Она была нелегкой. Астроном Д. Дьюхерст потратил в 1957 г. целый год на просмотр Паломарского атласа неба с целью сравнения его с каталогом 3С и проверенным каталогом Миллса, но из 93 ярких радиоисточников смог отождествить с галактиками и другими объектами только 21 объект. Другие 22 объекта были под сомнением, а 50 не отождествлялись совсем.

Лишь в декабре 1960 г. Алан Сэндидж сообщил на заседании Американского астрономического общества, что ему и Т. Метьюзу удалось отождествить объект 3С 48 со звездой 16^m . Специальные снимки этого участка неба, сделанные на 5-метровом телескопе, показали вокруг этой звезды слабые волокна туманности размером $5 \times 12''$. Был получен спектр звезды: в нем были ясно видны эмиссионные линии, но отождествить их не удавалось.

В 1962 г. А. Сэндидж и Т. Метьюз отождествили радиоисточник 3С 286 со звездой 17^m , у которой выявились необычные цветовые характеристики: в ультрафиолетовых лучах звезда была на целую звездную величину ярче, чем в обычных фотографических. В ее спектре тоже обнаружи-

лись эмиссионные линии, которые не отождествлялись ни с одним известным атомом или ионом; спектр ее был не похож на спектры сверхновых, белых карликов, планетарных туманностей, солнечной короны. То же самое оказалось и в случае радиоисточника ЗС 196: звезда 17^m с клочком туманности вокруг и столь же странным спектром.

Но разгадка приближалась. Астроном радиообсерватории Кембриджского университета в Джодрелл Бэнк К. Хазард предложил использовать для отождествления и точного определения положений этих объектов возможности покрытия их Луной. Тогда же, в 1962 г., ему удалось наблюдать покрытие Луной радиоисточника ЗС 212 и определить его точные координаты, поскольку движение Луны по небу известно с большой точностью. Затем Хазард переехал в Австралию и там совместно с австралийскими радиоастрономами М. Мэкин и А. Шимминсом пронаблюдал покрытие Луной самого яркого из таких объектов ЗС 273.

Выяснилось, что этот радиоисточник — двойной. С компонентой А была связана продолговатая туманность в виде струи длиной $11''$, направленная к компоненте В, расположенной в $20''$ и представляющей собой звезду 13^m , окруженную слабой туманностью (рис. 76).

Быть может, астрономам повезло в том, что этот объект мог (и притом довольно скоро) быть закрытым Луной. Перемещаясь по небу, Луна как бы вырезает узкую полосу шириной всего полградуса, расположенную недалеко от эклиптики. Правда, каждый месяц эта полоса немного смещается, но в сравнительно узких пределах: от $+29^\circ$ до -29° по склонению (иногда эти пределы сужаются еще более).

Сравнительно большая яркость звезды, отождествленной с ЗС 273, позволила Маартену Шмидту, молодому голландскому астроному, работавшему на обсерватории

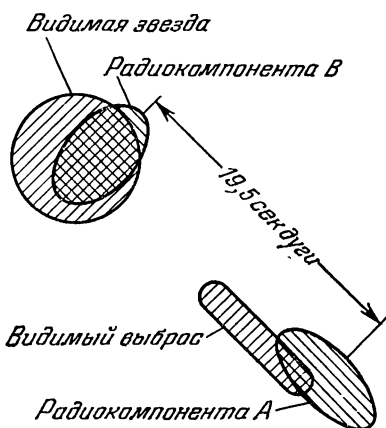


Рис. 76. Схема квазара ЗС 273 по оптическим и радионаблюдениям.

Маунт Паломар, получить ее спектр и приступить к отождествлению линий.

Сначала опять ничего не получалось. Все линии были какие-то неизвестные. Они не только не совпадали по своему положению с линиями известных объектов, но не совпадали и с линиями в спектрах ЗС 48 и ЗС 286, а те не совпадали между собой. Картина получалась все запутаннее. И вдруг молодой ученый нашел разгадку. Одна смелая мысль позволила сразу объяснить все странности спектров «радиозвезд».

Снова красное смещение

Почему вновь открытые радионисточники должны быть непременно радиозвездами, находящимися в нашей Галактике? — спрашивал себя Шмидт. — А что, если это столь далекие галактики, что они кажутся звездообразными? Если так, то они должны, как и все далекие галактики, удаляться от нас с большими скоростями, притом в каждом случае с различными. Но тогда по принципу Доплера все линии в спектре должны быть смещены к красному концу, и это смещение у каждого объекта будет свое.

М. Шмидт решил проверить свою догадку. Предположим, что самые яркие линии — это бальмеровская серия водорода. Длины волн линий этой серии должны быть связаны определенным соотношением, которое не будет искажено красным смещением.

В самом деле, если мы, как и раньше, обозначим $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$, где λ_0 — исходная длина волны, а $\Delta\lambda$ — смещение, вызванное эффектом Доплера, то длины волн линий серии окажутся равными $\lambda_1(1+z)$, $\lambda_2(1+z)$, $\lambda_3(1+z)$ и т. д., т. е. они все увеличатся в $(1+z)$ раз. Длины волн бальмеровской серии определяются по формуле Ридберга:

$$\lambda_1 = \frac{c}{R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)}, \quad \lambda_2 = \frac{c}{R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right)}, \quad \dots, \quad \lambda_n = \frac{c}{R \left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{(n+2)^2} \right]},$$

где c — скорость света, R — постоянная Ридберга. Легко видеть, что, если мы умножим все λ на $(1+z)$, соотношение между ними не изменится.

М. Шмидт применил этот прием к линиям ЗС 273 и добился успеха! Длины волн соответствовали линиям бальмеровской серии, умноженным на 1,16, следовательно, для этого объекта $z = 0,16$.

Вскоре таким же путем Дж. Гринстейн отождествил основные линии в спектре ЗС 48. Зная z , можно было без труда отождествить и все остальные линии. Кроме бальмеровских линий водорода, в спектрах ЗС 273 и ЗС 48 были найдены перещеленные линии ионов кислорода, неона и магния, а в дальнейшем и некоторых других элементов (рис. 77). Эти особенности спектров квазизвездных радиоисточников

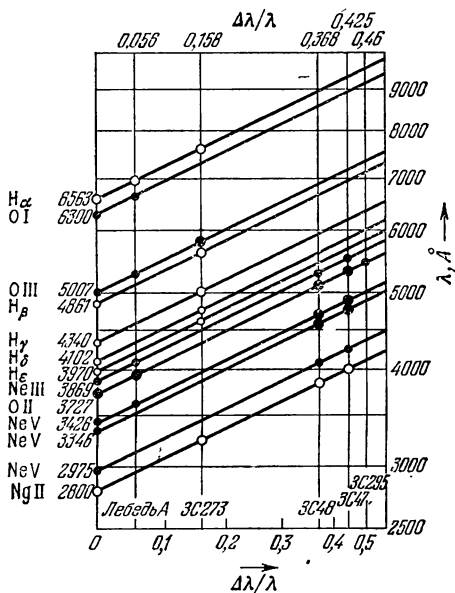


Рис. 77. Доплеровское смещение линий в спектрах квазаров.

мы обсудим позже. А пока обратим внимание читателя на то, что для ЗС 48 было найдено $z = 0,37$. Это означало, что этот объект удаляется от нас со скоростью $v = 0,3 c = 90\,000$ км/сек*). Значит, расстояние до него — около четырех миллиардов световых лет! Объект ЗС 273 удаляется со скоростью $v = 0,15 c = 45\,000$ км/сек и находится на расстоянии двух миллиардов световых лет.

*) При таких больших z мы не можем полагать, как раньше, $v/c = z$ (эта формула — приближенная для $z \ll 1$). Точная формула в рамках специальной теории относительности имеет вид $\frac{v}{c} = \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$. С учетом гравитации формула еще более усложняется.

После этого отождествление объектов и линий в их спектрах пошло полным ходом. В работу включились многие астрономы на разных обсерваториях, в том числе советские астрономы Э. А. Дибай и В. И. Проник, работавшие на Крымской южной станции Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга и на Крымской астрофизической обсерватории. К началу 1967 г. соединенными усилиями было отождествлено около 150 объектов; для 120 из них удалось получить спектры. По красным смещениям определили значения z . Ученые были поражены. Объекты ЗС 273 и ЗС 48 оказались чуть ли не самыми близкими к нам. У объекта ЗС 286 было найдено $z = 0,85$, у ЗС 245 $z = 1,03$, у ЗС 298 $z = 1,44$, у ЗС 9 $z = 2$. Как нетрудно было подсчитать, для ЗС 9 $v = 0,8c = 240\,000$ км/сек! Этот объект должен находиться в 10 миллиардах световых лет от нас! Но и он не является чемпионом по скорости и удаленности. Объект из четвертого Кембриджского каталога 4С 05.34 имеет $z = 2,88$, т. е. $v/c = 0,875$, и расстояние до него составляет 11 миллиардов световых лет. Напомним, что самая удаленная от нас радиогалактика ЗС 295, по определению Р. Минковского, имеет $z = 0,46$ и расстояние в 5 миллиардов световых лет. Объекты ЗС 9 и 4С 05.34 находятся вдвое дальше!

Такие гигантские расстояния поставили перед астрономами трудную задачу — с чем мы имеем дело: с далекими радиогалактиками или с чем-либо другим?

Радиогалактики или сверхзвезды?

Как можно было решить этот вопрос? По спектру? Но ведь и в спектрах радиогалактик наблюдаются эмиссионные линии. Правда, не все и не в таком количестве, как в спектрах квазизвездных радиоисточников, но наблюдаются. Таким образом, решающим фактором в выяснении вопроса о природе квазизвездных объектов спектр служить не мог, хотя, как мы скоро увидим, спектральные данные вносили важный вклад в получение ответа на этот вопрос.

Решение вопроса, являются ли квазизвездные объекты далекими галактиками, пришло неожиданно.

Вскоре после отождествления ЗС 273 московские астрономы А. С. Шаров и Ю. Н. Ефремов просмотрели около 50 фотопластинок, полученных на Московской обсерватории с 1896 г., и оценили по ним блеск этого объекта. И что

же — оказалось, что блеск объекта изменялся в пределах от $12^m,0$ до $12^m,7$, т. е. почти вдвое. Кроме длительных изменений наблюдались сравнительно быстрые (за несколько суток) флуктуации блеска на $0^m,2$ — $0^m,3$. Одновременно на обсерватории Гарвардского университета (США) Х. Смит и Д. Хоффлейт просмотрели 600 пластинок гарвардской коллекции и обнаружили, что средний блеск объекта изменяется на $0^m,6$ с циклом в 10 лет, а также испытывает менее значительные колебания с периодом около недели. Любопытно, что оба сообщения о переменности блеска ЗС 273 были сданы в печать в один день — 9 апреля 1963 г., но статья советских авторов вышла на день раньше.

Спустя некоторое время А. Сэндидж и Т. Метьюз, проводя серию фотоэлектрических наблюдений блеска ЗС 48, установили, что и он изменяется в пределах $0^m,4$ в течение нескольких месяцев и на $0^m,1$ за несколько дней.

Эти открытия переменности блеска квазизвездных объектов полностью исключили гипотезу, что перед нами — радиогалактики. Ведь размеры даже небольших галактик — порядка тысяч световых лет, и, даже если бы все звезды в галактике изменяли свой блеск «в унисон», мы не смогли бы это обнаружить, поскольку свет от более далеких звезд галактики опаздывал бы на тысячи лет по сравнению с более близкими.

Таким образом, переменность блеска квазизвездных объектов указывала на то, что мы имеем дело с единым телом. Более того, короткопериодические флуктуации блеска позволяли оценить верхний предел радиуса тела в одну световую неделю ($0,02$ светового года), т. е. $2 \cdot 10^{11}$ км. Это — в 300 000 раз больше радиуса Солнца, в 30 раз больше радиуса орбиты Плутона, но в 200 раз меньше расстояния до Альфы Центавра. Тела таких размеров были до тех пор неизвестны.

Между тем Х. Смит и Д. Хоффлейт сделали попытку оценить массу объекта ЗС 273. Считая, что 10-летние колебания блеска вызваны пульсацией тела, они оценили его массу в пределах 10^6 — 10^7 масс Солнца.

Вот тогда-то и появился термин «сверхзвезды», который применялся в нашей литературе около двух лет, уступив в середине 1965 г. место общепринятому в настоящее время термину к в а з а р ы. Слово квазар — сокращенное от «квазизвездный источник радиоизлучения» (по-английски quasi-stellar radio source). Этот термин был предложен Дж. Гринстейном в декабре 1963 г. Его удобство состоит

в том, что он не постулирует заранее никаких свойств объекта, а лишь его бесспорные внешние проявления.

Перед лицом вновь открытых небесных тел нового типа трудная задача выпала на долю теоретиков. Нужно было объяснить характер спектра квазаров, природу их радиоизлучения, построить их физическую модель. Но прежде надо было еще убедиться, действительно ли квазары находятся от нас на столь громадных расстояниях: ведь это налагало жесткие условия на величину испускаемой ими энергии. А нельзя ли было найти другое объяснение красному смещению в спектре квазаров?

Эффект Доплера или эффект Эйнштейна?

Да, такое объяснение имелось. Это был один из эффектов общей теории относительности, предсказанный Альбертом Эйнштейном еще в 1916 г. и вскоре подтвержденный на спектрах белых карликов, — так называемое гравитационное красное смещение. Суть его состоит в том, что в сильном гравитационном поле темп течения времени замедляется, поэтому частоты электромагнитных колебаний уменьшаются. Это и приводит к смещению всех линий спектра к красному концу на величину

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = z = \left(1 - 2 \frac{fM}{Rc^2}\right)^{-1/2} - 1,$$

где f — постоянная тяготения, M — масса, R — радиус тела, c — скорость света. Если $fM/Rc^2 \ll 1$, то можно упростить формулу, приведя ее к такому виду:

$$z = \frac{fM}{Rc^2} = \frac{1,47}{R} \frac{M}{M_{\odot}},$$

где радиус R должен быть выражен в километрах.

Очевидно, что для получения больших z нужно, чтобы масса тела была больше, а радиус меньше. Для типичного белого карлика ($R = 10^4$ км, $M = 0,5 M_{\odot}$) получим $z = 7,3 \cdot 10^{-5}$, т. е. намного меньше, чем у квазаров. Подставим теперь найденные выше параметры: $R = 2 \cdot 10^{11}$ км, $M = 10^7 M_{\odot}$, тогда получится... точно такое же z , как для белого карлика. Разумеется, приведенный выше радиус это только в е р х н и й п р е д е л, на самом деле он может быть меньше. Вспомнив, что для ЗС 273 $z = 0,158$, найдем такое условие для параметров этого тела: R (км) = $10 M/M_{\odot}$.

Дальше имеются две возможности. Или квазар — нейтронная звезда, уже испытавшая катастрофическое сжатие (коллапс), с массой в $1 M_{\odot}$ и радиусом около 10 км , находящаяся сравнительно недалеко от нас (ну, скажем, не ближе 300 и не дальше 3000 световых лет). Или это все-таки массивный внегалактический объект, но находящийся не столь далеко, как в случае, если красное смещение объясняется эффектом Доплера.

Анализ этих возможностей был проведен Дж. Гринстейном и М. Шмидтом в 1964 г. Вот тут-то и пригодились оптические спектры квазаров. Эмиссионные линии в них имели некоторую ширину, которую естественно было объяснить с позиций эффекта Эйнштейна так. Нейтронная звезда окружена газовой оболочкой, в которой и создаются эмиссионные линии (за счет свечения газа). Их ширина w обусловлена различием гравитационного потенциала на внешней и внутренней границе оболочки. Отсюда для толщины оболочки ΔR получаем простую пропорцию:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{w}{\Delta \lambda}.$$

Для ЗС 273 $w = 0,07 \Delta \lambda$ и, значит, $\Delta R = 0,7 \text{ км}$. Но нам известна излучательная способность водорода в линии H_{β} с единицы объема, равная $10^{-25} N_e^2 \text{ эрг/сек} \cdot \text{см}^3$, где N_e — концентрация электронов в газе. С другой стороны, измеренный на Земле поток излучения в той же линии от ЗС 273 равен $3,4 \cdot 10^{-12} \text{ эрг/сек} \cdot \text{см}^2$. Если теперь помножить первую величину на объем оболочки, равный $4\pi R^2 \Delta R$, то получим общее объемное излучение оболочки. Оно идет по всем направлениям равномерно и на расстоянии Земли d распределится на поверхность сферы, равную $4\pi d^2$. Значит, сокращая на 4π , можно составить уравнение

$$10^{-25} R^2 \Delta R N_e^2 = 3,4 \cdot 10^{-12} d^2.$$

Для удобства вычисления все расстояния переведем в сантиметры. Подставив в это уравнение $R = 10^6 \text{ см}$, $\Delta R = 7 \cdot 10^1 \text{ см}$, $d \geq 3 \cdot 10^{20} \text{ см}$, получим неравенство

$$N_e \geq 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

Но наличие столь высокой электронной концентрации совершенно несовместимо с присутствием в спектре ЗС 273 иррадированной линии двукратного иона кислорода $O \text{ III}$ на 5007 \AA , которое возможно только при $N_e \leq 10^7 \text{ см}^{-3}$. Таким образом, первая возможность полностью отпадает.

Исследуем вторую возможность. Как показали Грипстейн и Шмидт, если взять $N_e = 10^7 \text{ см}^{-3}$, то можно объяснить наблюдаемые красные смещения для квазаров ЗС 273 и ЗС 48 эффектом Эйнштейна, но это совершенно невозможно для других более далеких квазаров. Даже для ЗС 273 необходимо, чтобы $M/M_\odot > 7 \cdot 10^8$, а для ЗС 48 $M/M_\odot > 7 \cdot 10^{10}$, т. е. масса последнего объекта должна быть сравнима с массой Галактики. Для более далеких квазаров ширина эмиссионных линий не больше, чем у ближайших, и, значит, $\Delta R/R$ становится раз в 10 меньше, что еще более сужает накладываемые ограничения. Но самое главное затруднение, полностью разрушающее эту концепцию, состояло в том, что, как показал в 1964 г. Г. Бонди, уравнения состояния и условие устойчивости сверхмассивных тел требуют, чтобы $fM/Rc^2 \leq 0,31$, а следовательно, z не может превышать 0,62. Поскольку нам известно множество квазаров с $z > 0,62$, становится ясно, что для их объяснения эффект Эйнштейна не может быть применен.

Итак, единственным возможным объяснением красного смещения квазаров оставался эффект Доплера. Но разве это непременно означало, что квазары находятся на столь огромных, космологических расстояниях, измеряемых миллиардами световых лет? Нет, не обязательно. Можно было, например, предположить, как это сделал в 1964 г. Дж. Террел, что квазары были когда-то выброшены из нашей Галактики с колоссальными скоростями, которые мы и наблюдаем по красному смещению, тогда как расстояния до квазаров сравнительно невелики. В 1966 г. Ф. Хойл и Дж. Бербидж предположили, что квазары могли быть выброшены из сравнительно близких радиогалактик, в которых произошли мощные взрывы. Эта гипотеза получила название л о к а л ь н о й.

Анализ локальной гипотезы по просьбе Дж. Бербиджи выполнил его сотрудник П. Шриттматтер. Сразу же встал вопрос: если квазары выбрасываются по всем направлениям из многих галактик, то почему мы не наблюдаем квазаров с фиолетовыми смещениями? Расчеты показывали, что их должно было бы наблюдаться даже больше, чем с красными (из-за особенностей распределения энергии в спектре квазаров и зависимости потока их излучения от направления). Но мы их не наблюдаем совсем! Значит, нужно сделать одно из четырех предположений:

а) красное смещение имеет не доплеровскую природу (но эту возможность мы уже отвергли);

- б) квазары расположены на космологических расстояниях, т. е. локальная гипотеза неверна;
- в) все они выброшены из нашей Галактики;
- г) квазары с фиолетовыми смещениями почему-либо не могут наблюдаться.

Тщательное рассмотрение вопроса и сравнение с данными наблюдений заставило Шриттматтера отвергнуть последнюю возможность. Вариант в), предложенный Террелом, был необъясним логически. Наша Галактика вряд ли могла быть ареной катастрофического события, сопровождавшегося выбросом 150 квазаров, поскольку нет никаких свидетельств такого процесса, — радиоизлучение из центральных областей Галактики сравнительно слабое. И потом: в этом случае непонятно, почему мы не наблюдаем выбросов в других близких галактиках. Как остроумно заметил один из участников Бюраканского симпозиума по нестационарным явлениям в галактиках, проходившего в мае 1966 г., с точки зрения локальной гипотезы мощные радиогалактики и сейфертовские галактики тоже должны иметь локальную природу, поскольку их объяснение наталкивается на те же трудности, что и объяснение квазаров.

Однако, забегая вперед, отметим, что локальная гипотеза и сейчас продолжает оставаться предметом острых дискуссий и дополнительных исследований. И почти каждое такое исследование, основанное на анализе наблюдений, свидетельствует против локальной гипотезы. Подавляющее большинство ученых рассматривает квазары как далекие космологические объекты, участвующие в расширении Метагалактики. Правда, научные проблемы большинством вопросов не решаются. Но большинство научных аргументов говорит в пользу космологической гипотезы о природе квазаров. Давайте же и мы взглянем на них с этой точки зрения.

Теоретики идут на штурм

История «теоретического штурма» проблемы квазаров началась примерно за год до их открытия. Перед астрофизиками стояла тогда другая задача: объяснить природу радиогалактик. Ведь, например, радиогалактика Лебедь А не только с космическими лучами выбросила 10^{60} эрг энергии — величину того же порядка, что и энергия вращения всей нашей Галактики. Откуда берется такая чудовищная энергия?

В середине 1962 г. Ф. Хойл и У. Фаулер выдвинули гипотезу о сверхзвездах с массой $(10^5 \div 10^8) M_{\odot}$, находящихся в квазиравновесном состоянии и медленно сжимающихся. Сжатие этих сверхзвезд должно было завершиться, по Хойлу и Фаулеру, мощным ядерным взрывом, который и привел к образованию радиогалактики.

Собственно говоря, Хойл и Фаулер «материализовали», конкретизировали идею В. А. Амбарцумяна о существовании в центральных областях галактик дозвездных тел (возможно, очень большой массы), о которой мы уже рассказывали. Они приложили немало труда для ее обоснования. Правда, они, как и В. А. Амбарцумян, не объясняли, как образуются такие тела; они начинали свой анализ с «готовых» сверхзвезд. Не нужно их в этом винить. Ученый может начать анализ некоторого процесса с любого его этапа. Ведь если бы было доказано, что быстрым сжатием (коллапсом) сверхзвезд объяснить возникновение радиогалактик не удастся, можно было бы просто отбросить эту гипотезу и не ломать голову над вопросом, могут ли образоваться такие сверхзвезды и как именно.

Вот такая цепь рассуждений привела Хойла и Фаулера к их концепции. Минимальная энергия, необходимая для наиболее мощных радиоисточников, — порядка 10^{60} эрг. На самом деле она должна быть гораздо больше по трем причинам: а) распределение энергии между релятивистскими электронами — источниками радиоизлучения — и магнитным полем может отличаться от оптимального; б) нельзя пренебрегать энергией, передаваемой протонам и положительным ионам; в) в энергию релятивистских электронов переходит не вся энергия взрыва, а менее 10% (в действительности еще меньше). Все эти факторы заставляют увеличить оценки полной энергии взрыва до 10^{64} эрг. Но, как мы уже подсчитывали, переход в гелий вещества целой галактики, состоящей полностью из водорода, даст только 10^{63} эрг. Значит, источник энергии не ядерный, а скорее гравитация. Ведь гравитационная энергия обладает гораздо большим коэффициентом полезного действия, чем ядерная энергия: при массе тела в $(10^8 \div 10^9) M_{\odot}$ гравитационная энергия составляет около 10^{-2} от полной энергии, равной Mc^2 , против 10^{-3} в случае ядерной энергии.

Мы помним, что И. С. Шкловский пытался в 1960 г. объяснить излучение радиогалактик вспышками многих сверхновых, а Дж. Бербидж, развивая его идею, выдвинул свою гипотезу о цепной реакции взрывов сверхновых. Ф. Хойл

и У. Фаулер решили «собрать» все эти звезды в одно сверх-тело, по массе в миллионы раз превышающее Солнце.

Но как может такое тело сохранить устойчивость, не сжаться под действием чудовищных сил гравитации до размеров, определяемых гравитационным радиусом, уйдя под сферу Шварцшильда (стр. 93)? Ведь мы знаем, что даже звезды с массой больше $100 M_{\odot}$ неустойчивы и существовать не могут.

Хойл и Фаулер рассмотрели, как мы уже сказали, квазиустойчивую конфигурацию. В их сверхзвезде происходят конвективные движения во всей ее массе, внутри идут ядерные реакции, дающие часть энергии, высвобождаемой в виде оптического излучения. Пока выгорает водород, температура в центре доходит до 80 миллионов градусов, когда начнет выгорать гелий, она повысится до 400 миллионов. Эффективные температуры сверхзвезд для внешнего наблюдателя будут соответственно 70 и 150 тысяч градусов. Сверхзвезда вращается вокруг оси, что в данном случае очень важно. Часть своего момента вращения она передает окружающей среде, и в этом процессе образуются релятивистские частицы. Если масса сверхзвезды составляет $10^8 M_{\odot}$, энергия, выделившаяся в виде релятивистских частиц, будет не менее 10^{58} эрг, а «время жизни» такой сверхзвезды, определяемое длительностью водородного цикла ядерных реакций, — около 2 миллионов лет. Это значит, что мощность выхода энергии составит у нее свыше 10^{44} эрг/сек.

Что же будет дальше? Исчерпав запасы ядерного горючего, сверхзвезда начнет сжиматься. Но когда температура в центре повысится до миллиона градусов, начнется образование электронно-позитронных пар, часть которых будет превращаться в нейтрино и антинейтрино. Излучение нейтрино приостановит дальнейшее сжатие.

В своей первой работе Фаулер и Хойл рассматривали взрыв сверхзвезды в результате быстрого выгорания кислорода на последней стадии, но потом сами поняли, что допустили ошибку, и заменили концепцию общего взрыва предположением о выбросе огромных масс в $10^7 M_{\odot}$ со скоростями, близкими к скорости света.

Две первые работы Фаулера и Хойла были выполнены до открытия квазаров. Естественно, что это открытие привлекло всеобщее внимание к теории тел сверхвысоких масс. Американский теоретик (француз по национальности) Ф. Мишель предложил теорию взрыва сверхзвезды за счет уноса массы потоками нейтрино. Интенсивное излучение

нейтрино, образовавшихся из электронно-позитронных пар, приведет, с одной стороны, к уносу массы из недр сверхзвезды, а с другой стороны, к уменьшению давления излучения и быстрому сжатию (коллапсу). Но при этом оболочки звезды разлетится, так как «вынуто» ядро и притяжение резко падает (весь этот процесс, по расчетам Мишеля, не займет и часа). Количество освободившейся энергии, $3 \cdot 10^{61}$ эрг, вполне соответствует энергии квазаров.

Но эта остроумная теория «не прошла». Видный советский физик, академик Я. Б. Зельдович, пришедший в астрофизику ради решения новых задач, поставленных человечеству природой за последние 10 лет именно в мире звезд и квазаров, доказал ошибочность теории Ф. Мишеля. Он показал, что Мишель не учел ряд эффектов общей теории относительности, в частности замедление времени при коллапсе ядра. Поэтому сжатие до гравитационного радиуса будет происходить медленно и взрыв не получится.

Узнав о работе Я. Б. Зельдовича, профессор Фред Хойл (приезжавший в декабре 1963 г. в Москву) очень обрадовался: значит, прав он, Хойл, а не Мишель. Незадолго до этого Хойл попытался воспроизвести расчеты Мишеля, но получил лишь 1% того выхода энергии, который нашел Мишель.

Первые две попытки штурмовать проблему квазаров не дали результата. Но квазары существовали и требовали объяснения. И штурм возобновился. В нем приняло участие не менее 20 теоретиков, лучших специалистов мира. Один за другой в печати стали появляться статьи, посвященные теории квазаров. Наступление шло сразу по нескольким направлениям.

Одно из них, которое можно назвать разведывательным, преследовало цель — собрать как можно больше фактических сведений о квазарах путем наблюдений. Действительно, здесь удалось добиться многого. Применение методики, изложенной на стр. 341, но в рамках космологической гипотезы, позволило получить следующие сведения о типичных квазарах ЗС 273 и ЗС 48. Астроном Дж. Оук на обсерватории Маунт Вилсон по распределению энергии в спектре ЗС 273 нашел его эффективную температуру $16\,000^\circ$. Отсюда по видимой звездной величине и расстоянию можно было определить: абсолютная звездная величина квазара — 26^m (в 250 раз ярче нашей Галактики!); радиус ядра квазара $2 \cdot 10^{16}$ см; объем оболочки, высвечивающей в эмиссионных линиях, для ЗС 48 равен $2 \cdot 10^{60}$ см³,

откуда ее радиус равен $8 \cdot 10^{19}$ см, т. е. 80 световых лет. Поток излучения от квазара 3С 273 равен $3 \cdot 10^{47}$ эрг/сек, откуда из соображений стационарности плазмы под действием сил излучения и тяготения Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков еще в 1964 г. оценили массу ядра квазара в $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$. По объему оболочки и примерной концентрации

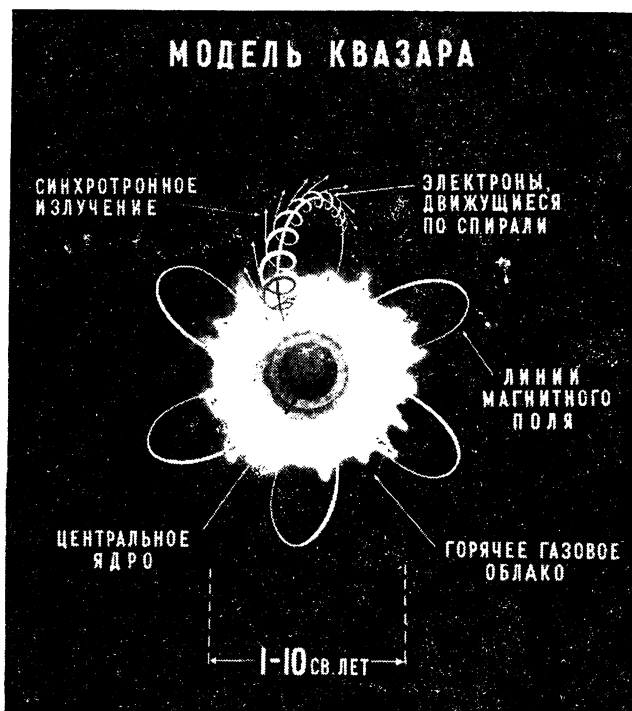


Рис. 78. Схема строения квазара.

ней электронов и протонов можно было найти и массу оболочки: $2 \cdot 10^7 M_{\odot}$ (около 1% всей массы квазара). Работает, все это — приближенные оценки, показывающие только порядок величины. Но уже они дают примерное представление о структуре квазаров.

Итак, квазар (рис. 78) состоит из массивного ядра размером в сотые доли светового года (или в сотни миллиардов километров) и окружающей его протяженной разреженной

газовой оболочки радиусом до 100 световых лет, где формируется эмиссионный спектр и радиоизлучение (именно здесь происходит торможение релятивистских электронов в магнитном поле квазара). Средняя плотность ядра квазара, по приведенным выше данным, не так велика: около 10^{-6} г/см³, что в миллион с лишним раз меньше средней плотности Солнца. Однако не исключено, что истинные размеры ядра гораздо меньше, поскольку плотный газ непрозрачен для высокотемпературного излучения и непрерывный спектр может создавать не само ядро, а окружающая его достаточно плотная атмосфера.

Другое направление в исследовании квазаров состояло в определении природы их радиоизлучения. Нетепловой характер оптического излучения, в частности сильное излучение в инфракрасном диапазоне, указывал на его синхротронное происхождение. По-видимому, и радиоизлучение имело такую же природу. Подобную точку зрения еще в 1964 г. высказал И. С. Шкловский. Он подсчитал, что напряженность магнитного поля, в котором тормозятся релятивистские электроны, порядка $2 \cdot 10^{-3}$ эрстед, а их общая энергия $2 \cdot 10^{56}$ эрг. При такой напряженности магнитного поля «время жизни» релятивистских электронов составляет 3000 лет, и это можно считать нижним пределом возраста квазара.

Верхний предел возраста можно получить, анализируя А-компоненту квазара 3С 273. Если считать, что А-компонента — это выброс из компоненты В, то можно подсчитать, что возраст квазара 200 000 лет. Но тогда придется предположить, что взрывов, поддерживающих радиоизлучение компоненты В, было несколько, что они, возможно, повторяются через 1—3 тысячи лет.

Это обстоятельство наводило на мысль о подобии этих взрывов со взрывами в радиогалактиках, а также в ядрах сейфертовских и «нормальных» галактик. И. С. Шкловский отверг как возможное объяснение взрывов выдвинутую ранее за четыре года до этого гипотезу о вспышках многих сверхновых, а также о столкновениях звезд в ядре квазара (была и такая гипотеза). Но предположить какой-либо другой механизм было трудно. Шкловский отдал предпочтение механизму аккреции, т. е. поглощения газа ядром после того, как «рассосется» очередной взрыв. Как только в ядре накопится некоторая критическая масса газа, согласно И. С. Шкловскому, может начаться образование сверхмассивных объектов, которые потом взрываются.

Однако эта гипотеза не была им разработана до конца, хотя гипотезу аккреции в разных вариантах разрабатывали многие ученые.

Как это ни странно, но, в отличие от оптического спектра квазаров, объяснение их радиоспектра синхротронным механизмом натолкнулось на трудности. На радиочастотах синхротронное излучение сильно поглощается в оболочке квазара. Объем квазара оказывается слишком малым, чтобы обеспечить наблюдаемое радиоизлучение. Тогда академик В. Л. Гинзбург и Л. М. Озерной предложили другой механизм: когерентное плазменное излучение. Колебания электронной плотности в квазаре образуют плазменные волны, которые, сталкиваясь друг с другом и с плазменными неоднородностями, рассеиваются и превращают свою энергию в электромагнитное излучение, причем предела мощности этого излучения для данного объема не существует.

Очень важным с точки зрения теоретиков был и вопрос о причинах колебаний блеска некоторых квазаров. Различные гипотезы для объяснения этого явления предложили в 1963—1964 гг. А. Сэндидж, Ф. Хойл, У. Фаулер, С. Колгейт, А. Камерон и ряд других астрофизиков. Но наиболее подробное исследование этого вопроса выполнил к концу 1964 г. молодой аспирант, ученик академика В. Л. Гинзбурга, Л. М. Озерной (ныне доктор наук).

Л. М. Озерной рассуждал следующим образом. Поскольку оптическое излучение квазара магнитно-тормозное (синхротронное), колебания этого излучения должны быть обусловлены колебаниями двух основных параметров, от которых оно зависит: напряженности магнитного поля и концентрации релятивистских электронов. Расчет показывал, что для объяснения колебаний блеска квазара 3С 273 требовались изменения напряженности магнитного поля на 20%. Вариации магнитного поля могут быть обусловлены причинами как геометрического, так и физического характера.

Простейшей геометрической причиной является вращение ядра вокруг оси, не совпадающей с осью магнитного поля. Тогда луч зрения будет пересекать области с различной напряженностью поля. Между прочим, если подсчитать по законам Кеплера и Ньютона период обращения частицы вокруг ядра с массой $10^8 M_{\odot}$ на расстоянии $2 \cdot 10^{16}$ см, то получим период около 5 лет — величину того же порядка, что и наблюдаемый период изменения блеска. При этом оболочка может не участвовать во вращении ядра.

Поиски физической причины колебаний блеска заставили молодого ученого присоединиться к исследователям третьего направления, ставившим целью построение теоретической модели квазаров. Озерной рассмотрел последовательно две модели: пульсирующей сверхзвезды и магнитоида.

Подход к модели сверхзвезды был не прост. Нужно было избежать ошибок Хойла и Фаулера, взяв в то же время из прежних работ максимум полезного. Картина получалась следующая.

Массивная сверхзвезда сжимается под действием гравитационного давления $p_{гр}$. Ему противодействует сумма газового давления p_g (включая давление электронов и других компонент плазмы) и давления излучения $p_{и}$. В звездах с массами $M > 100 M_{\odot}$ $p_{и} \gg p_g$, и можно учитывать только давление излучения. Излучение можно рассматривать тоже как газ с индексом политропы 3 (см. главу I), т. е. давление излучения $p_{и}$ пропорционально плотности ρ в степени $\gamma = 4/3$ ($p_{и} \sim \rho^{4/3}$). С другой стороны, гравитационное давление $p_{гр} \sim \rho^{4/3+\alpha}$, где $\alpha \ll 1$ — малая добавка, следующая из общей теории относительности. Учет этой добавки очень важен: если бы ее не было, сверхзвезда при любом ρ была бы в равновесии, так как показатели степени (γ) у $p_{гр}$ и $p_{и}$ были бы равны. Еще в 1949 г. советский астрофизик С. А. Каплан показал, что введение поправок за общую теорию относительности (будем называть их для краткости р е л я т и в и с т с к и м и) приводит к тому, что при сжатии любой массы плотность звезды в центре не превысит $3 \cdot 10^{10}$ г/см³. Влияние релятивистских эффектов на зависимость энергии звезды от ее плотности было уже в 1964 г. детально исследовано академиком Я. Б. Зельдовичем и кандидатом (ныне доктором) физико-математических наук И. Д. Новиковым. Они пришли к важному выводу, что в случае очень больших масс, существует некоторая критическая энергия, отделяющая область, где возможны устойчивые состояния звезды, от области, где такие состояния невозможны, и сжатие будет катастрофическим, т. е. наступит коллапс. Исходя из этого условия, Л. М. Озерной нашел, что звезда может сохранять устойчивость, если ее радиус будет больше некоторого критического:

$$R > R_{кр} = 2,3 \cdot 10^5 (M/M_{\odot})^{3/2} \text{ см.}$$

С другой стороны, чтобы сверхзвезда существовала достаточное время, «подкармливаясь» за счет ядерных реак-

ций, в ней должна быть достаточно высокая температура, а для этого необходимо сильное сжатие, которое определяется условием

$$R < R^* = 1,5 \cdot 10^{11} (M/M_{\odot})^{1/2} \text{ см.}$$

Оба условия вместе (если положить $R^* = R_{\text{кр}}$) дадут значение критической массы $M_{\text{кр}} = 6 \cdot 10^5 M_{\odot}$, и тогда $R_{\text{кр}} = 1,2 \cdot 10^{14}$ см, т. е. мы получим сверхзвезду почти в 200 раз меньше по диаметру, чем ядро квазара, и составляющую около тысячной доли его массы. Именно такой и была первая модель Озерного: небольшая сверхзвезда (странное сочетание слов, не правда ли?), эдакое «ядро ядра» квазара, поддерживаемое в равновесии за счет выделения энергии ядерных реакций и своими колебаниями в магнитном поле «большого ядра» вызывающее модуляцию этого поля. Действительно, магнитное поле сверхзвезды составляет в такой модели существенную долю поля ядра, и ее пульсации в пределах 10% по радиусу дали бы нужные колебания магнитного поля на 20%.

Но эта модель страдала рядом недостатков. Принять критическую массу нельзя было: тогда устойчивость сверхзвезды висела бы на волоске. При большей массе звезда быстро остывает, после чего теряет устойчивость, а при меньшей массе температура в ее центре недостаточна для гермоядерных реакций.

Казалось бы, положение безнадежное. Но Л. М. Озерному удалось найти выход. Да, если рассматривать статическую звезду, без каких-либо движений, то у нее $\gamma = 4/3$. Но если вещество звезды движется, оставаясь в динамическом равновесии, то тогда $\gamma = 5/3$. Это приводит к важным следствиям: оказывается возможным получить устойчивые решения.

Одним из таких решений и явилась вторая модель, предложенная Л. М. Озерным, — модель магнитоида. Так он назвал образование из замагниченной плазмы (плазмод), в котором происходят сильные турбулентные движения, обеспечивающие динамическое равновесие магнитоида. Это равновесие является квазистационарным, т. е. мало меняется со временем.

Модель магнитоида имела много преимуществ перед статической моделью сверхзвезды. Магнитная стабилизация турбулентных движений приводила к значениям критического радиуса $R_{\text{кр}} \sim 20 R_{\text{гр}}$, а так как гравитационный радиус $R_{\text{гр}} = 3 \cdot 10^5 M/M_{\odot}$ см, то для критической

массы $M_{кр} = 4 \cdot 10^8 M_{\odot}$ получался радиус $R_{кр} = 2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}$, т. е. величины того же порядка, что и у квазаров. Напряженность магнитного поля в ядре квазара ЗС 273, по этой модели, порядка $3 \cdot 10^5$ эрстед. Это вполне объясняло наблюдаемый поток оптического магнитно-тормозного излучения. Наконец, время жизни этой модели составляло миллионы лет и не зависело от массы, как в статической модели.

Озерному удалось объяснить и переменность блеска квазаров. Перемещения неоднородностей в магнитоиде должны приводить к изменениям его магнитного поля, а они в свою очередь — к колебаниям блеска квазара.

Л. М. Озерной развил даже гипотезу об образовании своих магнитоидов (плазмоидов) в межгалактической среде за счет стягивания материи магнитными полями или в ядрах галактик, где они могут образовываться за счет взрывных явлений. При взрывах в ядрах галактик могут выбрасываться массы порядка $10^6 M_{\odot}$, конденсирующиеся потом в звезды.

Эти выводы Л. М. Озерного были близки к идеям В. А. Амбарцумяна о крупных дозвездных телах, но отличались от них, так как Озерной рассматривал магнитоиды как промежуточную стадию развития, считая за начальную стадию гравитационное сжатие.

Казалось бы, что проблема квазаров решена. Но это было далеко не так. Теория Озерного была лишь одной из многих попыток решить эту проблему. А ведь были другие попытки, не менее и не более удачные. Так, например, академику Я. Б. Зельдовичу, И. Д. Новикову и Г. С. Бисноватому-Когану удалось построить стационарную модель вращающегося массивного ядра квазара с $M = 10^9 M_{\odot}$, которое из-за ускорения вращения в процессе сжатия будет терять массу с экватора. Вращение и истечение газа играют в этой модели ту же стабилизирующую роль, что турбулентность и магнитное поле в модели Озерного. Правда, скорость вращения у поверхности должна достигать 0,1 скорости света, а мы наблюдаем скорости, меньшие на порядок, но это можно объяснить тем, что в оболочке квазара скорости затухают. А ведь спектральные линии, по ширине которых мы судим о скоростях, формируются как раз в оболочке.

К сожалению, ширина спектральных линий ничего не говорит нам о характере движений в оболочке квазара. Это может быть быстрое вращение, но может быть и турбулентность. Поэтому сделать выбор между двумя моделями

на основании данных наблюдений не представлялось возможным.

Но выбирать приходилось не между двумя, а между многими моделями. Так, У. Фаулер выдвинул «пульсарную» модель квазаров, считая их быстро вращающимися намагниченными сверхзвездами. Близкую модель «спинаров» предложили П. Моррисон и А. Кавальере.

В этом и состояло бесспорное поражение теоретиков, штурмовавших проблему квазаров. Нельзя считать проблему решенной, если налицо имеются хотя бы два равноценных, но разных по существу решения. Какое из них выбрать? Пока мы не можем сделать выбор, мы не знаем правильного решения. А это и означает, что проблема пока еще не решена.

Взять проблему квазаров штурмом не удалось. Но астрофизики и не думали сдаваться. Началась вторая фаза наступления, которую вполне можно сравнить с правильной осадой крепости.

Начало правильной осады

Когда полководец ведет осаду крепости, которая, судя по имеющимся у него сведениям, не намерена сдаваться добровольно, он вырабатывает определенный план осады. В одних случаях роют подкопы, чтобы подорвать ворота или стены крепости, в других надеются на истощение у осажденных припасов и воды, в третьих подготавливают новый штурм, в четвертых применяют ту или иную хитрость. Передко те или иные приемы используют одновременно.

Примерно в таком же положении оказались астрономы к середине 1968 г., когда закончился первый штурм проблемы квазаров. Какие же пути избрали они для ведения осады этой «крепости»?

Первый путь был — собирание все новых и новых данных наблюдений. Больше сведений о каждом квазаре в отдельности и о как можно большем их количестве. К октябрю 1971 г. было выявлено 202 квазара. Начались статистические исследования: материала для этого было уже достаточно. Появились и новые отдельные наблюдательные факты, представлявшие интерес.

Второй путь состоял в сопоставлении свойств квазаров и родственных им объектов: квазизвездных галактик (к в а з а г о в), радиогалактик, галактик Сейферта, взрывающихся и других. Этот путь тоже оказался весьма плодотворным.

Третий путь заключался в продолжении теоретических исследований. Здесь важно было не только построить внутренне непротиворечивую теорию, объясняющую данные наблюдений, но и найти такое ее следствие, которое можно было бы обнаружить с помощью наблюдений и которое бы по возможности однозначно указывало на справедливость данной теории. Хотя исследования в этом направлении продолжались, решающего успеха они не принесли ни одной теории.

Каковы же важнейшие результаты исследований последних лет? Начнем с наблюдательных фактов.

Было открыто мощное и **и н ф р а к р а с н о е** и з л у ч е н и е квазаров. Впервые это излучение было обнаружено у квазара 3С 273 в 1964 г. Г. Джонсоном на волне 2,2 микрона. В дальнейшем в исследование инфракрасного излучения квазаров включился американский специалист по физике низких температур Ф. Лоу. Незадолго до этого Лоу разработал прибор для измерения очень низких температур, близких к температуре жидкого гелия (4°K). Основную часть его составлял приемник излучения из германия, легированного галлием. Лоу понял, что подобный приемник может быть использован для регистрации слабых потоков инфракрасного излучения, и стал искать ему новые применения. Это и привело его в астрономию.

Благодаря работам Лоу и его сотрудников выяснилось, что квазары и ядра сейфертовских галактик основную долю своей энергии испускают именно в инфракрасной области спектра. Полная светимость квазара 3С 273 оказалась гораздо больше, чем предполагалось ранее, и в тысячи раз больше, чем у нашей и у других галактик (порядка $6 \cdot 10^{48}$ эрг/сек против $6 \cdot 10^{44}$ эрг/сек у нашей Галактики). Это открытие предъявляло новые требования к энергетике квазаров. Требовалось объяснить и их странный спектр с максимумом в инфракрасной части (рис. 79).

Другим, довольно странным результатом наблюдений явилось открытие того факта, что большинство линий поглощения в спектрах очень далеких квазаров ($z > 2$) группируется около значения $z = 1,95$. Это можно было объяснить тем, что поглощающая масса газа удаляется от нас именно с таким z , т. е. ее выброс соответствовал какому-то определенному моменту времени. Но вскоре обнаружили другие системы линий с меньшими значениями z . Их стали истолковывать как результат поглощения в массах газа, имеющих другие скорости. Но нашлось и другое объяснение: поглощение в газовых облаках, выброшенных

из самого квазара и двигающихся хотя и от нас, но медленнее, чем квазар. Наконец, обнаружались линии поглощения, у которых z было больше, чем у эмиссионных линий. Здесь мы скорее всего имели дело с облаками газа, падающими на квазар.

Однако не все было гладко с этими линиями. Они были очень узкие, что указывало на малую дисперсию (разброс) скоростей газовых облаков. Это плохо увязывалось с гипотезой центрального выброса, да и гипотезы выброса из квазара или падения облаков газа на квазар с трудом могли объяснить это обстоятельство.

Следующей новинкой явилось наблюдение квазаров методами сверхдальней радиоинтерферометрии. В обычном радиоинтерферометре длина базы — расстояние между антеннами — измеряется сотнями метров или километрами. Но можно увеличить ее в тысячу раз, если заставить согласованно работать две антенны, разделенные расстояниями в тысячи километров. Во столько же раз возрастает разрешающая способность интерферометра.

Этот метод был предложен еще в 1965 г. советскими учеными Л. И. Матвеевко, Н. С. Кардашевым и Г. Б. Шоломницким и практически осуществлен американскими учеными во главе с К. И. Келлерманом в 1967 г. Начиная с 1969 г. советские и американские ученые провели несколько рядов совместных наблюдений на базах Грин Бэнк — Симеиз и Голдстоун — Симеиз длиной свыше 8000 км.

Наблюдения проводились на различных волнах от 2,8 до 50 см. С одной стороны, исследователям было выгодно

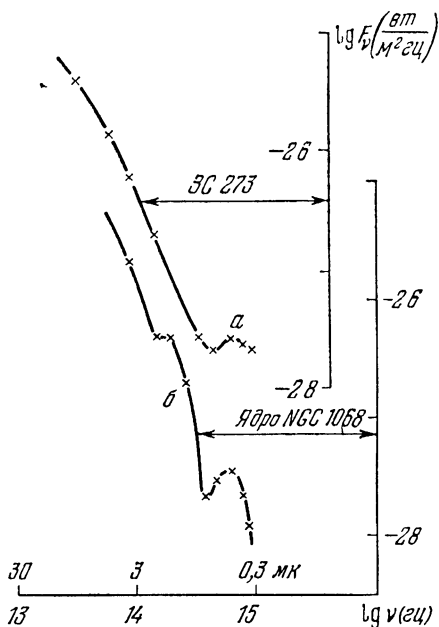


Рис. 79. Распределение энергии в спектре квазара (а) и сейфертовской галактики NGC 1068 (б).

применять короткие волны, ибо тогда в базе укладывалось большое число длин волн (а это число достигало 287 миллионов на волне 2,8 см). С другой стороны, на коротких волнах понижалась чувствительность радиointерферометра из-за большего уровня шумов и меньшей стабильности гетеродинов. Но короткие волны давали и большее разрешение, поэтому советские и американские ученые в июне 1971 г. начали эксперимент на волне 3,5 см одновременно на трех радиотелескопах (это позволяло исключить влияние шумов).

Применение этой методики позволило довести разрешающую способность радиointерферометра до $0'',0003$ — это в 30 раз лучше, чем у оптических интерферометров. Под таким малым углом можно было бы видеть футбольный мяч с расстояния 140000 км или земной шар с расстояния в один световой год.

Таким способом были измерены 26 квазаров, несколько сейфертовских и радиогалактик, определены их видимые размеры (или верхние пределы диаметров) и структура. Особенно подробно были изучены квазары 3С 273 и 3С 279. У квазара 3С 273, кроме известных компонент А и В, были выявлены еще две: С и D. Компонента С — это внутренняя часть компоненты В. Если размер В $0'',022$, т. е. $2,2 \cdot 10^{20}$ см (220 световых лет), то С в 11 раз меньше (20 световых лет), а D — меньше $0'',0004$, т. е. меньше 4 световых лет. Возможно, что это лишь концентрические оболочки вокруг ядра, которое еще на два порядка меньше, так что обнаружить его с такой техникой невозможно. Для этого надо применить базу Земля — Луна или Земля — межпланетная станция.

Квазары и аномальные галактики

Что же дало сопоставление свойств квазаров и аномальных галактик? На важность такого сопоставления указал еще в 1964 г. И. С. Шкловский. С тех пор различные ученые пытались провести сравнение свойств квазаров и аномальных галактик, причем не только качественное, но и количественное.

В 1966 г. американский астроном Д. Хишен построил диаграмму «светимость — поверхностная яркость» (в радиодиапазоне), на которую нанес спиральные и неправильные галактики, ядра галактик, радиогалактики и квазары (рис. 80) по данным наблюдений на волне 21 см. Хишен

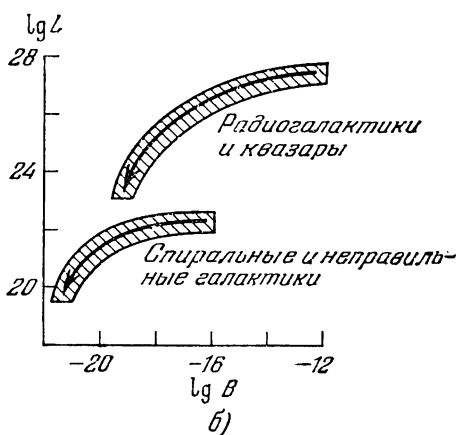
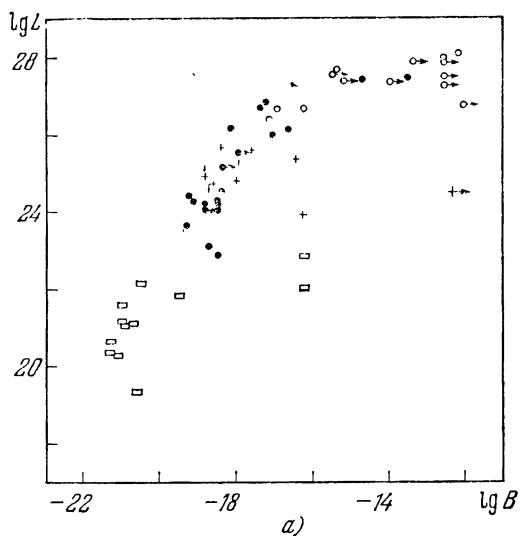


Рис. 80. Зависимость светимости галактик, радиогалактик и квазаров от их поверхностной яркости: а) по данным наблюдений, б) — по схеме Л. Хишена (прямоугольники — спиральные и неправильные галактики, крестики — ядра галактик, черные кружки — радиогалактики, светлые кружки — квазары).

сравнивал, таким образом, абсолютную радиосветимость, т. е. общую интенсивность радиоизлучения, и поток излучения с единицы поверхности объекта (например, с квадратной секунды дуги). Первая величина характеризовала мощность излучения источника (на волне 21 см), вторая — его компактность.

На первый взгляд (рис. 80, а) кажется, что все объекты ложатся на одну полосу (как звезды на главную последовательность) и лишь несколько из них отскакивают вправо. Среди них — сейфертовские галактики NGC 1068, NGC 1275, испускающие радиоволны, известная нам взрывающаяся галактика М 82, ядро аномальной радиогалактики М 87, радиогалактика ЗС 218. И Хишен решил поиному начертить основные последовательности: отдельно для радиогалактик и квазаров, с одной стороны, и для спиральных и неправильных галактик, с другой (рис. 80, б). Во всяком случае диаграмма Хишена показывала, что по этому признаку квазары родственны радиогалактикам, что они имеют более мощное излучение и более компактны, чем обычные галактики. Но эти факты были известны и ранее. Кроме того, диаграмма Хишена являлась косвенным доказательством справедливости космологической гипотезы квазаров, так как только в этом предположении точки для самых мощных радиогалактик и для самых слабых квазаров ложились рядом, а их области перекрывались.

В августе 1967 г. известный английский радиоастроном, профессор Райл, выступая с лекцией на XIII съезде Международного астрономического союза в Праге, сравнил спектры радиогалактик и квазаров на волнах от 3 см до 10 м. У радиогалактик спектр был линейным (в логарифмической шкале), у квазаров обнаружился завал на низких частотах, объясняемый самопоглощением, т. е. поглощением радиоволн в оболочке самого квазара. Подробную теорию этого эффекта развил советский астроном В. И. Слыш. Опираясь на представление о магнитно-тормозном (синхротронном) характере излучения квазаров и радиогалактик, М. Райл высказал мысль, что это — различные стадии в эволюции одного и того же класса объектов.

Как же протекает эта эволюция? Райл сопоставил расстояния между компонентами в двойных радиоисточниках, их линейные диаметры и радиосветимость, расставив все источники в порядке увеличения расстояний между компонентами (рис. 81). Квазары и радиогалактики перемежались на этом графике, их радиосветимость тоже «плясала», хотя

наибольшие радиосветимости были у тесных пар. Райл заключил отсюда, что радиисточник «живет» около 10^5 лет, а потом облака плазмы, выброшенные из ядра, уходят, рассеиваются и радиосветимость источника резко падает.

В 1968 г. Л. М. Озерной сделал попытку систематизировать все аномальные объекты по признаку концентрации вещества к центру. У него получилась некоторая последовательность, в которой возрастают и концентрация, и

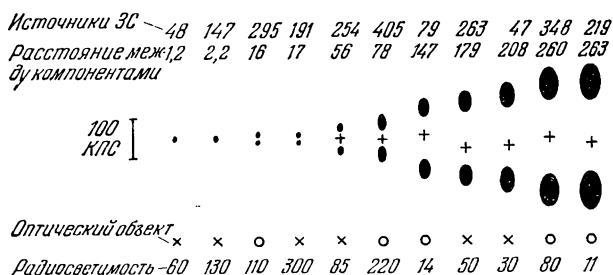


Рис. 81. Изменение расстояний между компонентами в квазарах и радиогалактиках (по М. Райлу).

оптический поток излучения, и радиопоток (радиосветимость). Последовательность эта имела следующий вид:

$$I - S - E - D - BCG - N - QSG - QSS,$$

где I, S, E — уже известные нам классы галактик по классификации Хаббла, D — радиогалактики, N — N-галактики, BCG — компактные голубые галактики Цвикки, QSG — квазаги, QSS — квазары. Но является ли эта последовательность эволюционным рядом или отражает различие начальных условий? После тщательного анализа Л. М. Озерной отверг обе эти гипотезы в их «чистом виде» и остановился на компромиссной: оба фактора действуют одновременно, и надо лишь найти отрезки эволюционных ветвей.

В 1970 г. Озерной построил двумерную диаграмму, основанную на идее о том, что каждый из внегалактических объектов большую часть своей жизни находится в «нормальном» состоянии, а меньшую часть — в «возбужденном». Между ними возможно еще промежуточное состояние (рис. 82).

По идее Озерного, сейфертовские галактики (SyG) являются возбужденным состоянием спиральных галактик

(S), сильные радиогалактики (sRG) — возбужденным состоянием эллиптических галактик (E). В обоих случаях возможно промежуточное состояние с возбужденным ядром, которое проявляет себя в виде компактной оптической или радиогалактики. Возможен также переход из него в состояние нормальной радиогалактики (nRG). Голубые компактные галактики Цвикки и квазаги тоже скорее всего не основные, а промежуточные стадии возбуждения для N-галактик и квазаров соответственно. Их основные состояния, их основные состояния,

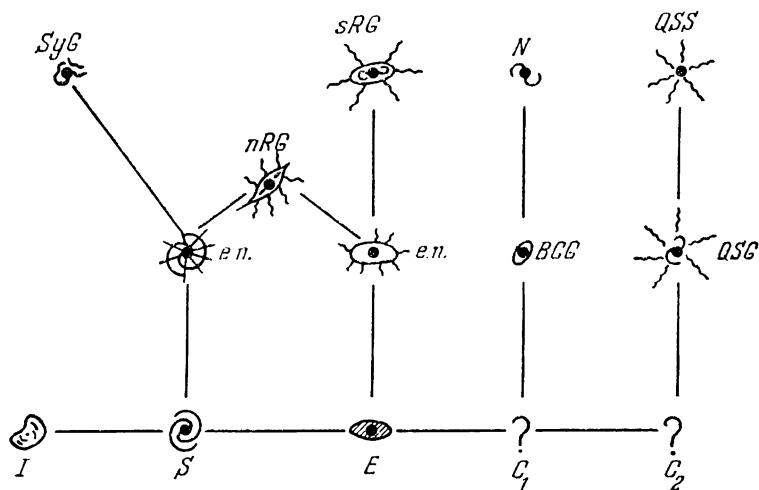


Рис. 82. Схема эволюции галактик и квазизвездных радионсточников по Л. М. Озерному.

обозначенные буквами C_1 и C_2 , пока не выявлены, но, по мнению Озерного, это тоже должны быть компактные галактики.

Озерной исходил из известного факта, что число сейфертовских галактик составляет около 1% от числа спиральных (той же светимости), число сильных радиогалактик — 5% от числа эллиптических, N-галактик — около 1% от числа компактных голубых галактик, наконец, квазаров — 1% от числа квазизвездных галактик, или квазаров. Значит, возбужденное состояние длится около одной сотой длительности основного состояния. Не исключено, что возбужденное состояние может периодически повторяться после сравнительно долгого периода «спокойствия».

Иную схему эволюции внегалактических объектов предложил спустя полтора месяца советский астрофизик Б. В. Комберг (рис. 83). Совместно с Р. А. Сюняевым он рассмотрел возможность того, что квазизвездные объекты являются ранней стадией формирования ядер в протогалактиках. Если эта идея подтвердится, то эволюционные пути могут выглядеть и так:

квазары — ядра N-галактик — ядра сильных радиогалактик,
 квазаги — ядра компактных голубых галактик — ядра эллиптических галактик,
 ядра сейфертовских галактик — ядра спиральных галактик.

В последнем ряду неясно начальное (досейфертовское) состояние этой группы галактик. Возможно, что их родоначальников следует искать среди слабых квазагов.

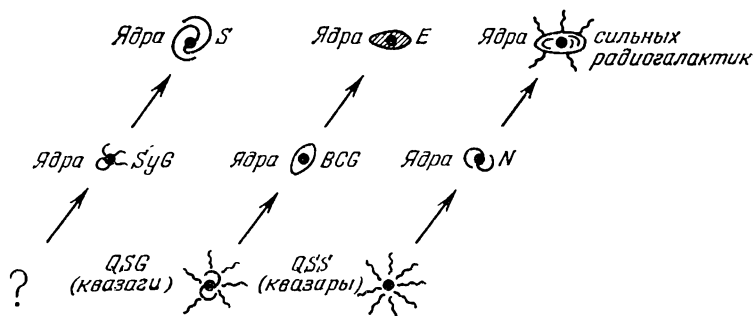


Рис. 83. Схема эволюции галактик и квазизвездных радионисточников по Б. В. Комбергу.

По идее Б. В. Комберга, квазизвездные объекты возникают на начальной стадии образования галактик среди больших масс газа, из которых потом формируется сама галактика. Квазар же (или квазаг) превращается в ее ядро. Как и в схеме Л. М. Озерного, возбужденное состояние ядер (на стадии их зарождения) длится недолго, 10^6 — 10^7 лет, промежуточное состояние — дольше (10^8 — 10^9 лет), а основное — около 10^{10} лет. Но по схеме Комберга возбужденные состояния являются начальными, а основные — конечными, тогда как в схеме Озерного стадии возбуждения напоминают вспышки новых или сверхновых.

Существует и еще одна точка зрения, выдвинутая недавно Б. А. Воронцовым-Вельяминовым. Обратив внимание на то, что квазары никогда не наблюдаются в скоплениях

галактик, он пришел к выводу, что квазар может быть начальной стадией скопления. Не одной галактики, а целого скопления галактик! Но в скоплениях бывает от десятков до тысячи галактик, а значит, их общая масса должна составлять $(10^{12} \div 10^{14}) M_{\odot}$. Между тем самые оптимистические оценки масс квазаров не превосходят $10^{10} M_{\odot}$. Избегание ими скоплений галактик, видимо, связано с условиями образования как квазаров, так и скоплений, которые нам, увы, все еще неизвестны.

Невозможно пока дать и ответ на вопрос, какая из эволюционных схем: Л. М. Озерного или Б. В. Комберга — ближе к действительности. Возможно, что правильной окажется какая-то третья схема. Интересные идеи в отношении классификации и эволюции компактных объектов, включая квазары, сейфертовские и N-галактики, развивает американский астрофизик У. Морган. Есть новые результаты в этом направлении и у А. Сэндиджа. Но рассказывать о них здесь, пожалуй, было бы преждевременно.

Прежде чем проститься с квазарами, нелишне будет еще раз напомнить читателю, что идеи об активности ядер галактик и о решающем влиянии их на развитие самих галактик были высказаны В. А. Амбарцумяном еще в 1958 г., задолго до открытия квазаров и целого ряда классов аномальных галактик. Еще раньше, в 1947 г., он высказал гипотезу о Д-телах. И хотя ядра квазаров могут не оказаться теми таинственными Д-телами, о которых говорил В. А. Амбарцумян, сам факт их открытия показывает, что мы еще далеко не все типы небесных тел знаем и можем изучать. После квазаров были открыты пульсары, рентгеновские и гамма-источники, мазерное излучение облаков межзвездного гидроксила, излучение двух десятков сложных молекул в межзвездном пространстве, наконец, реликтовое тепловое излучение Мегалактики. Автор очень сожалеет, что объем книги не позволяет ему рассказать и об этих выдающихся открытиях. Но наука продолжает расширять наши знания о Вселенной. И на одном из ее фронтов — на «квазарном фронте» не затихают упорные бои. Осада квазаров продолжается.

Г л а в а VII

ГОРЯЧАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Ищем начало пути

Прочитав три предыдущие главы, иной читатель может упрекнуть нас в непоследовательности. Почему после главы об эволюции «нормальных» галактик мы вдруг вышли на просторы Метагалактики, а потом вернулись к аномальным галактикам и квазарам, т. е. после общей картины обратились к деталям, правда, важным и интересным, но все же к деталям.

И все-таки иного пути у нас не было. Ведь понимание природы квазаров и их места во Вселенной было бы немислимо, если бы астрономы не обнаружили их красного смещения и не объяснили природу этого явления. Поэтому надо было прежде познакомить читателей с явлением красного смещения и разбеганием галактик, иначе говоря, сперва описать сцену, место развития действия, а потом выводить на нее такие действующие лица, как квазары. Кроме того, исторически квазары и аномальные галактики были открыты и изучены гораздо позже, чем расширение Метагалактики. С другой стороны, открытие квазаров и взрывов в галактиках оказало существенное влияние на понимание процессов, с которых началось это расширение, на понимание начальной фазы развития нашей Вселенной.

Чтобы внести полную ясность в терминологию, поясним, что н а ш е й В с е л е н н о й мы будем называть часть Вселенной, доступную нашему восприятию (а не только изученную к настоящему времени). Наша Вселенная включает в себя Метагалактику как систему галактик, но, возможно, что ею не ограничивается. Наша Вселенная представляет собой лишь часть Большой Вселенной.

Мы убедились в главе V, что Метагалактика расширяется, что это расширение реально. А поскольку метрика пространства и даже ход времени непрерывно связаны с распределением в нем материи, от которой пространство и время

неотделимы, можно с полным правом говорить о расширении нашей Вселенной, об изменении ее свойств во времени.

Но что было в начале процесса расширения? «Атомотец», как утверждал Леметр, или бог-творец, как громогласно заявлял папа Пий XII? Разумеется, нет! Так что же? Гигантский взрыв, перед которым бледнеют даже такие взрывы «местного значения», как взрыв в галактике М 82 или в Лебеде А? Весьма возможно. А если так, то что взорвалось и почему?

Вот мы и подошли вплотную к проблеме «Большого Взрыва» (по-английски «big-bang»). Мы уже убедились, что взрывные процессы чередуются в природе с процессами медленной эволюции. Вспышки на Солнце и в звездах, новые и сверхновые, взрывы в галактиках — вот примеры взрывов все возрастающих масштабов. Можно ли ставить ограничение энергии взрывов во Вселенной? Очевидно, нельзя. Поэтому в принципе такой сверхмощный взрыв вполне возможен.

Признание идеи такого взрывоподобного начала развития нашей Вселенной вполне вытекает из известного диалектического принципа сочетания эволюционной и революционной форм развития и неизбежности скачков. «Жизнь и развитие в природе, — писал В. И. Ленин, — включает в себя и медленную эволюцию и быстрые скачки, перерывы постепенности» *). «Большой Взрыв» и был, очевидно, таким скачком, после которого началась спокойная, эволюционная стадия развития, свидетелями которой мы являемся в настоящее время. И произошел он, как всякий другой взрыв, без какого-либо вмешательства творца, без нарушения законов сохранения материи и энергии, но сопровождался переходом одних форм существования материи в другие.

Как это могло произойти, мы сейчас узнаем.

Горячая Вселенная

Гипотезу о том, что наша Вселенная в прошлом была очень горячей, высказал впервые в 1946 г. Г. А. Гамов. Любопытно, что он сначала не связывал этот вопрос с расширением Вселенной: горячая Вселенная нужна была Гамову для объяснения происхождения химических эле-

*) В. И. Ленин, Соч., изд. 4-е, т. 16, стр. 319.

ментов. Вскоре Гамов понял, что в статических равновесных условиях объяснить процесс образования элементов невозможно и надо рассматривать динамический процесс, связанный с расширением Вселенной. Для разработки этой идеи он привлек двух других физиков: Р. Альфера и уже известного нам Г. Бете. 1 апреля 1948 г. вышел журнал «Physical Review» («Физическое обозрение»), содержащий краткую заметку Альфера, Бете и Гамова с изложением этой теории, которая поэтому получила название α — β — γ -теории. (Злые языки утверждали, что Гамов специально подобрал себе соавторов с фамилиями, напоминавшими первые буквы греческого алфавита.) Дальнейшее развитие теории горячей Вселенной было выполнено в 1949—1953 гг. самим Г. А. Гамовым, а также Р. Альфером и Р. Германом, сотрудниками лаборатории прикладной физики Университета Дж. Гопкинса (США).

Согласно α — β — γ -теории, на первом этапе расширения вся материя состояла из смеси нейтронного газа и излучения, которой авторы теории дали название «илем» (это слово, взятое из Библии, обозначает «первичный хаос»). В процессе расширения илема нейтроны распадались, образуя протоны и электроны, затем протоны захватывали нейтроны, образуя атомные ядра. Последующий захват нейтронов в сочетании с β -распадом должен был объяснить образование всех сложных ядер. Весь этот процесс, по Альферу и Герману, должен был занять полчаса!

Несмотря на все достоинства α — β — γ -теории, она не могла объяснить наблюдаемое соотношение различных элементов во Вселенной, а также образование ядер с малым числом нейтронов. Главной трудностью, которую теория α — β — γ так и не смогла преодолеть, является отсутствие стабильных ядер с атомными весами $A = 5$ и 8 . Поэтому захват нейтронов должен был оборваться на гелии ($A = 4$). Вот почему эта теория была оставлена и уступила место теории образования химических элементов в недрах звезд, разработанной в 1954—1957 гг. в основном трудами нашего старого знакомого Ф. Хойла, а также У. Фаулера, А. Каме-рона и супругов Бербиджей.

Но та часть исследований Г. А. Гамова, Р. Альфера и Р. Германа, которая касалась изучения условий на самых первых этапах существования горячей Вселенной, не пропала даром. Прежде всего ими были установлены законы изменения во времени температуры T и плотности: отдельно вещества (ρ_m) и излучения (ρ_r).

Здесь надо сделать некоторые пояснения. Поскольку, как мы знаем, излучение обладает массой, можно говорить и о его плотности, т. е. о массе, приходящейся на единицу объема. В наше время плотность излучения в окружающей нас части Вселенной на несколько порядков ниже плотности вещества. Но на заре эволюции нашей Вселенной положение было существенно иным: плотность излучения намного превосходила плотность вещества. Почему это было так, понять нетрудно, поскольку царили сверхвысокие температуры, а энергия излучения (и пропорциональная ей масса фотонов) пропорциональна четвертой степени температуры.

Вот как выглядели законы изменения температуры и плотности, выведенные Альфером и Германом (t — время в секундах, протекшее от начала взрыва):

$$T = 1,5 \cdot 10^{10} t^{-1/2} \text{ (градусов),}$$

$$\rho_m = 1,7 \cdot 10^{-2} t^{-3/2} \text{ (г/см}^3\text{),}$$

$$\rho_r = 4,5 \cdot 10^5 t^{-2} \text{ (г/см}^3\text{).}$$

Попробуем наглядно представить себе эти условия. Для этого составим следующую таблицу:

| t , сек | 10^{-6} | 10^{-3} | 1 | 10^3 |
|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| T , °К | $1,5 \cdot 10^{13}$ | $5 \cdot 10^{11}$ | $1,5 \cdot 10^{10}$ | $5 \cdot 10^8$ |
| ρ_m , г/см ³ | $1,7 \cdot 10^7$ | $5 \cdot 10^2$ | $1,7 \cdot 10^{-2}$ | $5 \cdot 10^{-7}$ |
| ρ_r , г/см ³ | $4,5 \cdot 10^{17}$ | $4,5 \cdot 10^{11}$ | $4,5 \cdot 10^5$ | $4,5 \cdot 10^{-1}$ |

| t , сек | 10^6 (12 дней) | $3 \cdot 10^{13}$ (10^6 лет) | $3 \cdot 10^{17}$ (10^{10} лет) |
|------------------------------|----------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| T , °К | $1,5 \cdot 10^7$ | $2,5 \cdot 10^3$ | 25 |
| ρ_m , г/см ³ | $1,7 \cdot 10^{-11}$ | 10^{-22} | 10^{-28} |
| ρ_r , г/см ³ | $4,5 \cdot 10^{-7}$ | $4,5 \cdot 10^{-22}$ | $4,5 \cdot 10^{-30}$ |

При взгляде на эту таблицу поневоле охватывает ужас, священный трепет перед величиной и многообразием природы. Сравните условия, приведенные в крайнем левом столбце (одна микросекунда после взрыва) и в крайнем правом (современная эпоха). Температура, превосходившая в первый момент 10 триллионов градусов, упала на 12 порядков, плотность вещества, равная вначале средней плот-

ности наиболее плотных белых карликов, упала на 35 порядков, а плотность излучения — на целых 47 порядков!

Обратим внимание и на другое. Если вначале плотность излучения превосходила плотность вещества на 10 порядков, то теперь она в 20 раз ниже *). Нетрудно подсчитать, когда плотности излучения и вещества уравнились: это произошло примерно через 20 миллионов лет после начала расширения, когда температура излучения понизилась до 600 градусов по абсолютной шкале.

Вернемся, однако, к гипотезе о горячей Вселенной. После неудачи α — β — γ -теории в объяснении происхождения элементов и успешного решения этой же проблемы на основе теории образования элементов в недрах звезд интерес к гипотезе горячей Вселенной заметно остыл. В течение десяти лет (1953—1963) не было выполнено ни одного сколько-нибудь значительного исследования в этом направлении.

Более того, у гипотезы горячей Вселенной появилась опасная соперница — гипотеза холодной Вселенной. Ее начал разрабатывать в 1962 г. академик Я. Б. Зельдович, которого не удовлетворяли некоторые противоречия «горячей» модели.

В самом деле, из расчета Альфера и Германа следовала недопустимо высокая плотность излучения в наше время и слишком большая эффективная температура излучения: 25 градусов. Радиоастрономические наблюдения не обнаруживали ничего похожего.

Далее, к моменту окончания ядерных реакций ($t = 200$ сек) в результате распада нейтронов и захвата их протонами должно было образоваться около 20% (по массе) атомов гелия и около 0,6% дейтерия (тяжелого водорода). Но даже сейчас, спустя 10 миллиардов лет, доля дейтерия составляет лишь 0,02%, а доля гелия — меньше 20% **).

Перебрав все возможные варианты (холодный нейтронный газ, газ из нейтронов с примесью антинейтрино и др.), Я. Б. Зельдович остановился на гипотезе, согласно которой исходным веществом был холодный протонно-электронный газ с примесью нейтрино, причем на каждый протон приходилось по одному электрону и одному нейтрино. При-

*) Расчет Альфера и Германа для современной эпохи дает лишь грубое приближение: все величины завышены на один-два порядка. Впоследствии эта ошибка была устранена, хотя качественные соотношения не изменились.

**) Так полагали 10 лет назад. В настоящее время содержание гелия принимается около 30% (см. стр. 378).

сутствие нейтрино на ранних стадиях развития «уберегало» протоны и электроны от взаимодействия друг с другом и превращения протона в нейтрон, потому что при таких реакциях должны возникать новые нейтрино. Между тем нейтрино принадлежит к числу так называемых фермионов, частиц, подчиняющихся правилам статистики Ферми, согласно которым в данном квантовом состоянии не может быть одновременно больше одной частицы. При большой плотности нейтринного газа для новых нейтрино буквально не остается места (в наборе квантовых состояний), поэтому реакции между протонами и электронами запрещены. А по мере разрежения вещества прямые столкновения между протонами и электронами станут маловероятными, зато начнется захват электронов на орбиты и образование атомов водорода. Чистый холодный водородный газ — таков исходный материал для образования звезд. Все остальные элементы, включая гелий и дейтерий, формируются уже в звездах.

Эта гипотеза была высказана Я. Б. Зельдовичем в 1962 г. и защищалась им до 1964 г. Никто тогда не знал, что пройдет еще год и холодные лучи из мирового пространства вновь подогреют интерес ученых всего мира к гипотезе горячей Вселенной. И самым горячим ее сторонником и исследователем станет Яков Борисович Зельдович.

Следы далекого прошлого

В начале 1964 г. в «Докладах Академии наук СССР» появилась небольшая заметка двух молодых ученых: А. Г. Дорошкевича и И. Д. Новикова, сотрудников академика Зельдовича. В ней рассматривалась возможность наблюдательной проверки того, была ли наша Вселенная на заре своего существования горячей или холодной. Если Вселенная была когда-то горячей, должно было сохраниться остаточное, или реликтовое, излучение. Его температуру Альфер и Герман оценили в 25°K , но они могли и ошибиться. Во всяком случае искомое излучение должно было прийти на область радиоволн.

Но в этой области существуют и другие источники излучения — далекие галактики. Их излучение делится на две составляющие: суммарное тепловое излучение звезд и нетепловое радиоизлучение релятивистских электронов. К счастью, эти две составляющие имеют совершенно разный ход по спектру и их нетрудно разделить (рис. 84).

Разумеется, речь здесь идет не о дискретных, даже очень далеких галактиках, которые мы можем наблюдать каждую в отдельности. Дорошкевич и Новиков рассматривали метагалактический фон, создаваемый столь далекими галактиками, что мы их не можем наблюдать раздельно. Характерной особенностью кривых является минимум на волнах

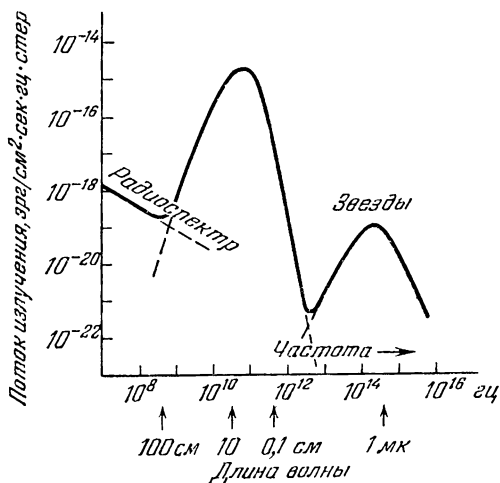


Рис. 84. Составляющие космического радиоизлучения.

около 1 мм. Но именно в этой области могут проявить себя еще два источника излучения: межгалактическая и галактическая пыль и реликтовое излучение.

Пыль, получая энергию за счет излучения звезд и галактик, может нагреваться до очень низкой температуры (5—10 °К) и излучать по законам теплового излучения. Однако ее спектр должен отличаться от спектра реликтового излучения.

Увы, заметка А. Г. Дорошкевича и И. Д. Новикова прошла незамеченной. Никто тогда не бросился к радиотелескопам, чтобы наблюдать метагалактическое радиоизлучение на миллиметровых и сантиметровых волнах. Открытие пришло случайно.

С июля 1964 г. по апрель 1965 г. научные сотрудники американской фирмы «Белл телефон лаборатори» А. Пензиас и Р. Уилсон проводили исследование шумов, возникающих в 6-метровой рупорно-рефлекторной антенне, пред

назначенной для связи с искусственными спутниками Земли. Наблюдения велись на волне 7,35 см, причем антенна направлялась на различные участки неба. В течение всего времени наблюдений был зарегистрирован постоянный радиощум, соответствующий температуре излучателя 3,5 °К. Излучение было изотропно (т. е. одинаково для всех направлений), не поляризовано и не подвержено сезонным изменениям.

Неужели обнаружено реликтовое излучение Метагалактики? Пензиас немедленно позвонил в Принстонский университет профессору Роберту Дикке, который со своими сотрудниками незадолго до этого начал разрабатывать гипотезу горячей Вселенной. Как это ни странно, но Дикке и его группа ничего не знали ни о работах Гамова, Альфера и Германа, ни о недавних исследованиях Дорошкевича и Новикова. Они исходили из совсем других соображений, в частности из модели пульсирующей Вселенной. Развивая теорию, принстонцы одновременно готовили и установку для наблюдений фонового излучения Метагалактики. Сотрудники фирмы «Белл» их опередили.

Теоретическая статья Р. Дикке и его коллег и сообщение А. Пензиаса и Р. Уилсона о первом наблюдении реликтового излучения были опубликованы рядом в одном и том же номере «Астрофизического журнала» (США). И сразу же несколько групп исследователей принялись за проверку полученных результатов.

Начался настоящий штурм фонового излучения на широком фронте длин волн. На крайнем длинноволновом фланге повели атаку английские ученые Т. Хауэлл и Дж. Шейкшафт. Уже в 1966 г. им удалось зафиксировать фоновое излучение на волне 20,7 см и оценить его температуру в 2,8 °К. На следующий год они провели наблюдения на волнах 49 и 73,5 см и получили температуру 3,7 °К. Наблюдения на столь длинных волнах уже затруднены галактическим радиоизлучением, но английским ученым удалось его выделить и учесть.

В центре, в области сантиметровых волн, вели атаку американцы, сотрудники Принстонского и Калифорнийского университетов. Коллеги профессора Дикке пустили наконец свою установку, а затем построили три прецизионных (точных) радиометра, работавших на волнах 3,2, 1,58 см и 8,56 мм. Значения температуры получились 3,0 °К, 2,68 °К и 2,56 °К соответственно. Калифорнийская группа на волне 1,5 см получила 2,5 °К. Ученые из Массачусетского техно-

логического института на волне 9,24 мм измерили температуру 3,16 °К.

На следующем участке фронта наступали советские радиоастрономы, сотрудники трех институтов: Физического института им. П. Н. Лебедева, Института радиотехники и электроники (Москва) и Научно-исследовательского радиофизического института (Горький). На волне 8,2 мм А. Е. Салонович, В. У. Пузанов и К. С. Станкевич получили температуру излучения Метагалактики 2,9 °К.

Область самых коротких, миллиметровых волн снова обеспечили американцы: принстонская группа и две группы астрономов-спектроскопистов из обсерваторий Китт-Пик и Ликской. Принстонцы на волне 3,3 мм измерили температуру 2,6 °К. Это была самая короткая волна, на которой измерения велись непосредственно.

Все результаты измерений прекрасно легли на теоретическую кривую, изображающую ход по спектру интенсивности теплового излучения с температурой 2,7 °К (рис. 85). Но надо было еще изучить крайний правый участок в области длин волн меньше 3 мм, там, где кривая круто идет на спад. Из-за резкого усиления излучения водяного пара нашей атмосферы в этой области прямые методы не годились. Надо было либо выносить приборы за пределы тропосферы, что было сопряжено с громадными техническими трудностями, либо применять какие-то другие методы.

Один из таких методов указал член-корреспондент АН СССР И. С. Шкловский. Еще в 1941 г. в спектрах некоторых звезд были обнаружены полосы межзвездных молекул циана CN, а также углеводорода CH и его иона CH⁺. Эти молекулы не могли принадлежать атмосферам звезд, ибо под действием мощного излучения звезды они должны были бы диссоциировать на атомы. Значит, они находятся в межзвездном пространстве и на них тоже должно действовать реликтовое излучение Метагалактики. Под действием этого излучения молекулы будут возбуждаться.

Чтобы оценить интенсивность космического излучения на миллиметровых волнах, надо выяснить, какая доля молекул циана возбуждена до различных уровней. Это можно сделать, сравнив интенсивность линий, образованных за счет электронных переходов с тех же уровней. В этом-то и состояла идея И. С. Шкловского.

И вот П. Тадеус и Дж. Клозер на обсерватории Китт-Пик получили на волне 2,63 мм вращательную температуру 3,75 °К. Астрономы Ликской обсерватории, ис-

пользуя 3-метровый рефлектор со спектрографом, таким же путем нашли температуру от 2,4 до 3,4 °К. Позже П. Тадеус и его соотрудники использовали линию R (2)

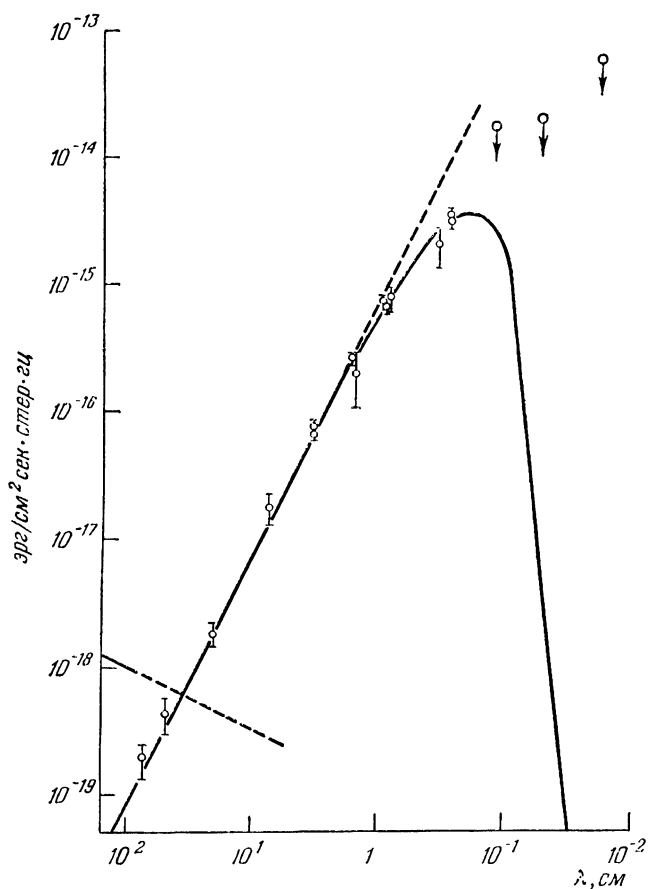


Рис. 85. Ход по спектру реликтового излучения.

молекулы CN и нашли на волне 1,32 мм температуру 2,83 °К. Наконец, они попытались забраться в субмиллиметровую область, изучая спектры межзвездных молекул CO и CN⁺, но здесь им удалось оценить только верхний предел интенсивности излучения (две крайние точки справа на рис. 85 со стрелкой, направленной вниз).

Казалось бы, все ясно. Но нужно было еще показать, что наблюдаемое излучение не может иметь иную природу, в частности, не связано ли оно с космической пылью. Эту возможность рассмотрели английские ученые Дж. Шейкшафт и А. Уэбстер. Оказалось, что предположение о переизлучении частицами пыли энергии излучения окружающих звезд приводит к неожиданным следствиям: мощность галактического радиоизлучения должна тогда в 100 раз превосходить мощность излучения в оптическом диапазоне. Однако результаты измерений на волнах 3 и 7,5 см, а также на более длинных волнах говорили как раз об обратном: полное радиоизлучение Галактики на 4 порядка слабее, чем оптическое. Таким образом, гипотезу об излучении пыли пришлось отвергнуть.

Реликтовое излучение Метагалактики — наследие горячего прошлого нашей Вселенной — полностью вступило в свои права. Гипотеза горячей Вселенной получила решающее экспериментальное подтверждение.

Первые десять минут

Было и еще одно обстоятельство, которое наводило на мысль, что Вселенная в прошлом была горячая. Это — космическое содержание гелия. Различные ученые, анализируя данные спектрального анализа света Солнца, звезд различных классов, туманностей, межзвездного газа, а также состав первичных космических лучей, оценили содержание гелия от 7 до 20% содержания водорода. Это было мало с точки зрения теории горячей Вселенной, которая требовала 30%, но чрезмерно много, если считать, что весь гелий образовался в звездах.

Еще до открытия реликтового излучения, в 1964 г., Ф. Хойл и Р. Тэйлер опубликовали следующий простой расчет. Общее выделение энергии в нашей Галактике за счет излучения составляет $4 \cdot 10^{43}$ эрг/сек. Галактика существует 10^{10} лет, или $3 \cdot 10^{17}$ сек. За это время она выделила энергии $12 \cdot 10^{60}$ эрг. Синтез 1 грамма гелия дает $6 \cdot 10^{18}$ эрг энергии. Отсюда можно без труда рассчитать, что за указанное время могло быть синтезировано $2 \cdot 10^{42}$ г гелия. Но общая масса Галактики составляет 10^{11} солнечных масс, или $2 \cdot 10^{44}$ г. Таким образом, количество гелия, синтезированного в звездах, должно было бы составить лишь 1% всей массы Галактики, тогда как его в 7—20 раз больше. Значит, был другой «поставщик» гелия. Это мог быть либо первичный

взрыв, либо большое количество взрывов меньшего масштаба, связанных, например, с образованием квазаров. Во всяком случае для образования гелия была необходима температура, превышавшая миллиард градусов.

Но что происходило при таких чудовищных температурах? Какие частицы присутствовали и какие между ними происходили реакции? На помощь исследователям пришли ядерная физика и физика элементарных частиц. А опорными вехами им служили факты. Одним из таких фактов было уже описанное реликтовое излучение. Другим — относительное космическое обилие гелия. Третьим — соотношение количества квантов излучения и количества барионов в Метагалактике.

Зная среднюю плотность вещества в окружающей нас части Вселенной ($\sim 10^{-30}$ г/см³), можно перевести это число в концентрацию барионов, поделив на массу бариона $1,6 \cdot 10^{-24}$ г. Получим приблизительно 10^{-6} бариона/см³. В то же время плотность излучения составляет около 100 квантов/см³, т. е. около 10^8 квантов на один барион!

Много это или мало? На первый взгляд кажется, что много. Но посмотрим на этот факт с другой точки зрения. Откуда взялось излучение? Разумеется, не от магических слов «Да будет свет!» воображаемого творца. Но от чего же? Вспомним, что кроме барионов существуют антибарионы, кроме обычного вещества существует антивещество. Античастицы столь же устойчивы, как и обычные частицы, и имеют такое же «право на существование». Вот только столкновение их с частицами обычного вещества ведет к их аннигиляции — к превращению тех и других в гамма-кванты и нейтрино. Именно за счет этого процесса и появилось излучение, причем теперь ясно, что нынешние барионы — жалкие остатки прежней армии барионов, которых было в 100 миллионов раз больше, чем теперь. Эта армия встретилась с другой столь же могучей армией антибарионов. Началось взаимное истребление. Конечно, армии встретились не фронт с фронтом (хотя шведский астрофизик Х. Альвен допускал и возможность «фронтальных» схваток на границах областей, где преимущество имел тот или другой вид вещества), бой кипел в каждой клочке пространства. В жаркой схватке полегли обе армии, дав начало излучению. Но барионов было чуть больше, чем их противников. На каждые 100 миллионов антибарионов приходилось 100 000 001 барион. Последний барион — один из 100 мил-

лионов — выживал. Из этих «выживших» барионов сложены звезды, галактики, межзвездный газ, планеты, из них сложены и мы с вами.

Ну, а если бы победили антибарионы? Да ничего практически не изменилось бы. Мир был бы таким же. Только ядра атомов имели бы отрицательный заряд, а вокруг них обращались бы положительные позитроны. Строение атомов, законы природы остались бы прежними. И все считали бы, что именно так и должно быть.

А что было бы, если бы числа частиц и античастиц были равны? Тогда количество квантов на один барион было бы еще в миллиарды раз больше, чем теперь. Все-таки часть барионов (и антибарионов) уцелела бы, так как при понижении температуры и разрежении вещества они бы просто не успели столкнуться друг с другом, а затем столкновения стали бы маловероятными. Но в этом случае на один барион приходилось бы уже 10^{18} квантов излучения.

Все эти соображения были высказаны в 1965 г. Я. Б. Зельдовичем и годом позже Х. Цзю, американским физиком, китайцем по национальности. Оба они пришли к выводу, что Вселенная на ранней стадии существования была зарядово-несимметрична. Числа барионов и антибарионов (а также электронов и позитронов) были в ней не равны друг другу, хотя разница была ничтожной.

Итак, состав «действующих лиц» на самом первом этапе существования горячей Вселенной был ясен: это были барионы (в основном протоны и нейтроны) и антибарионы, электроны и позитроны, мезоны всех видов, световые кванты, нейтрино и антинейтрино. Для полноты картины Я. Б. Зельдович ввел еще два класса частиц, экспериментально пока не обнаруженных: гравитоны (кванты тяготения) и кварки — праэлементарные частицы, из которых, возможно, образовались все остальные. Незадолго до этого все аспекты гипотезы кварков были подробно рассмотрены Я. Б. Зельдовичем, Л. Б. Окунем и С. Б. Пикельнером.

Кварки должны были первыми сойти со сцены, образовав другие виды элементарных частиц. Затем началось побоище барионов и антибарионов. Оно продолжалось... несколько сотысячных долей секунды. В результате увеличилась плотность излучения, количество нейтрино и мезонов. На время (увы, очень короткое) установилось «царство мезонов».

Но «царство мезонов» было недолгим. С понижением температуры до 10^{12} градусов мезоны начали аннигилировать

ровать и распадаться, порождая электроны, позитроны и нейтрино. Повысилась и плотность излучения. Все это происходило на первых тысячных долях секунды с момента начала расширения.

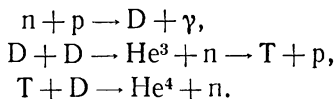
После «свержения» владычества мезонов все виды нейтрино «получили свободу», иначе говоря, их плотность понизилась до такой степени, что они перестали взаимодействовать с другими частицами и друг с другом. Значительно раньше (можно сказать, с самого начала) такой свободой пользовались гравитоны, сохранившие ее до наших дней. Вот почему гравитоны так неуловимы, и по той же причине так трудно поймать «обретшие свободу» нейтрино. Выражаясь научным языком, сечение взаимодействия нейтрино (а тем более — гравитонов) с другими частицами (а значит, и с приборами, состоящими из этих частиц) близко к нулю.

Наступило «царство электронов и позитронов». Оно продолжалось довольно долго — около одной минуты, пока температура не упала до нескольких миллиардов градусов. После этого электроны и позитроны, подобно барионам и антибарионам, начали истреблять друг друга, аннигилировать.

Может возникнуть вопрос: почему же они этого не делали раньше, когда температура и плотность были еще выше? Они аннигилировали и тогда, и даже очень интенсивно. Но с такой же скоростью происходил тогда и обратный процесс — рождение электронно-позитронных пар. На смену «павшим» частицам рождались новые и тут же, с ходу, вступали в бой. А так как с понижением температуры процесс рождения пар резко замедляется, новые частицы перестали рождаться, а старые продолжали аннигилировать. В выигрыше опять оказались кванты излучения: его плотность повысилась до современного уровня. Небольшое количество электронов уцелело до наших дней, войдя в состав атомов или оставшись в межзвездной плазме.

Впрочем, далеко не все «современные» электроны имеют такое «первичное» происхождение. Вернемся к барионам и посмотрим, какова была их дальнейшая судьба. К моменту окончания схватки с антибарионами ($t = 10^{-4}$ сек) протонов и нейтронов осталось примерно поровну (рис. 86). Но при дальнейшем понижении температуры нейтроны начали медленно распадаться, превращаясь в протоны и выделяя электроны и антинейтрино. Количество протонов возрастало, количество нейтронов падало. На второй минуте от начала расширения начался захват нейтронов протонами с об-

разованием ядер дейтерия, трития (тяжелые изотопы водорода) и, наконец, гелия. Пошли первые ядерные реакции:



Здесь n — нейтрон, p — протон, D — ядро дейтерия, T — ядро трития. По расчетам А. Г. Дорошкевича и Р. А. Сюняева, на основании которых построен рис. 86, максимальное содержание дейтерия составило $6 \cdot 10^{-4}$, трития $2 \cdot 10^{-5}$

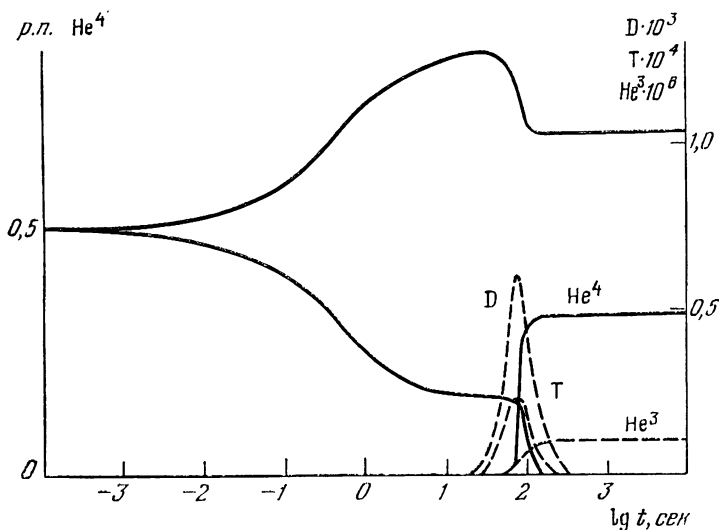


Рис. 86. Схема изменения состава барионов и атомных ядер на стадии ядерных реакций (по А. Г. Дорошкевичу и Р. А. Сюняеву).

от общей массы вещества. Но уже к пятой минуте расширения дейтерий и тритий практически исчезли, превратившись в гелий. Содержание основного изотопа гелия He^4 уже на второй минуте достигло своего современного значения — около 30% по массе от всего космического вещества. На долю легкого гелия (He^3) пришлось всего $3 \cdot 10^{-6}$ массы. Остальные 70% составил водород. Тяжелых элементов тогда еще не было, и только литий начинал формироваться из гелия, достигнув концентрации $7 \cdot 10^{-7}$.

Перед учеными снова во весь рост встала проблема гелия. Все расчеты: Дорошкевича и Сюняева, Хойла и Тэйлер, Вагонера, Фаулера и Хойла — показывали, что гелия во Вселенной должно быть около 30%. Но прежние наблюдательные данные свидетельствовали, как мы помним, о 7—20 процентах. Как разрешить это противоречие?

Начался пересмотр наблюдательных данных. Согласно сводке состава частиц первичных космических лучей, составленной еще в 1956 г. Г. Зюссом и Г. Юри, доля гелия по массе составляла в них 24%, по более поздней сводке А. Камерона — 38%. В среднем получалось 31%, ровно столько, сколько требовала теория. В молодых звездах и туманностях, как отметила Р. Тэйлер в своем вводном докладе на специальном симпозиуме по проблеме гелия во Вселенной, созванном в августе 1970 г. в Брайтоне (Англия), обнаружено присутствие гелия в количестве 25—40%, причем большинство определений дают меньшие значения в этом диапазоне (т. е. 25—32%), а в среднем — 29%.

В атмосфере Солнца гелий составляет по массе 44%, и примерно таково же его содержание в звездах главной последовательности. Но, как обнаружили в 1966 г. У. Сарджент и Л. Сирл, у старых звезд галактического гало (население II) отношение содержания гелия к содержанию водорода в 100 раз меньше. Этот факт, конечно, требовал объяснения, но он не мог изменить общей картины. Как отметили те же Сарджент и Сирл уже в 1972 г., различные наблюдательные данные давали оценки содержания гелия в пределах 26—32%, в полном согласии с теорией.

Значит, теория правильно описывала события, развертывавшиеся в горячей Вселенной в период ядерных реакций... Но первые десять минут протекли. Температура упала ниже миллиарда градусов. Ядерные реакции прекратились. Вселенная продолжала расширяться.

Что было до взрыва?

А теперь предоставим нашей Вселенной спокойно расширяться и охлаждаться — у нее есть еще целый миллион лет до той поры, пока температура не понизится до 3500 °К и не станет возможным образование нейтральных атомов, из которых потом образуются галактики и звезды. Поставим перед собой самый трудный вопрос: а что же было раньше, до «Большого Взрыва»?

Авторы креационистских *) гипотез Леметр и Милли отвечали на этот вопрос, не задумываясь: ничего не было, был только бог. Многие зарубежные ученые говорят более витиевато: судить о периоде до взрыва мы не можем, так как время (и пространство) было сведено в точку и потеряло смысл, Вселенная прошла через с и н г у л я р н о с т ь.

Сингулярность буквально означает особую точку. В математике особыми точками называют точки в каком-нибудь пространстве или поле величин, где решение уравнения (или системы уравнений) обращается в бесконечность. В формальных решениях уравнений Эйнштейна момент начала расширения тоже является сингулярностью: плотность и температура вещества здесь обращаются в бесконечность.

Формально так оно и получается, и, если не требуется тщательно исследовать события вблизи момента взрыва, наши ученые тоже говорят о «точке сингулярности» и о времени, протекшем от сингулярности. Но это — чисто условно. А если говорить по существу, то дело обстоит так.

Советские ученые исходят из того, что известные нам законы физики справедливы до чудовищных плотностей 10^{93} г/см^3 и интервалов времени $10^{-43} \text{ сек}^{**}$). Впрочем, свой анализ они начинают с плотности, гораздо меньше предельной, 10^{17} г/см^3 , и с момента около 10^{-7} сек . Что было между $t = 0$ и $t = 10^{-7} \text{ сек}$, особого интереса не представляет, поскольку состояние вещества в этом интервале никак не влияет на его дальнейшую судьбу. Возможно, что когда-нибудь ученые углубятся и в этот интервал.

Но уже теперь Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков поставили еще более дерзновенный вопрос: а что было при $t < 0$, т. е. до взрыва? Поставили на вполне научной основе. «Решение загадки, — пишут они, — возможно, если предположить, что при $t < 0$ имела место фаза с ж а т и я вещества».

«Предположим, — продолжают Зельдович и Новиков, — что при $t \approx -10^{18} \text{ сек}$ никаких антибарионов не было, имелись только барионы (нуклоны, обычные ядра, ионы и атомы). Средняя плотность в этот момент равнялась

*) От латинского «creo» — творю или французского «creation» — сотворение.

**) Эти числа получаются из комбинации трех мировых постоянных: скорости света $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$, постоянной Планка $h = 6,62 \times 10^{-27} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{сек}$, постоянной тяготения $f = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{сек}^2$. Величина с размерностью плотности равна c^5/f^2h , с размерностью времени — $(fh/c^5)^{1/2}$.

10^{-30} г/см³. Предположим, что к этому моменту в результате ядерных реакций или гравитационных процессов выделилась энергия порядка $E_1 = 10^{16}$ эрг/г».

Сделаем несколько пояснений. Выбранный для начала рассуждений момент — за 30 миллиардов лет до взрыва. Плотность вещества — примерно такая же, как сейчас. Количество выделившейся энергии на грамм массы — в 700 раз меньше того, что выделяется при превращении водорода в гелий. Но при данной плотности этого достаточно, чтобы потом, в ходе сжатия, эта энергия (которая первоначально могла находиться в форме оптических квантов и энергичных нейтрино) могла перейти в другие формы и в свое время породить почти в равном количестве барионно-антибарионные пары.

Короче говоря, Зельдович и Новиков рассматривают как бы зеркально отраженный во времени ход событий: не от сверхплотного горячего состояния к разреженному холодному, а наоборот. Они рассматривают два варианта модели сжатия: случай однократного сжатия, которое сменится расширением, причем это расширение будет продолжаться неограниченно, и случай многократных сжатия и расширения. Первый случай реализуется для открытой бесконечной Вселенной, второй — для замкнутой конечной модели, в которой плотность больше критической ($\rho > \rho_{кр}$). Как мы знаем, пока данные наблюдений говорят в пользу первой модели ($\rho < \rho_{кр}$).

Проблема далекого прошлого нашей Вселенной — до начала расширения — пока мало разработана, хотя она, безусловно, заслуживает внимания. В работе Зельдовича и Новикова почти ничего не говорится о состоянии материи в период сжатия. Попробуем все-таки представить себе Вселенную в этот период.

В сжимающейся Вселенной

Итак, представим себе, что мы находимся во Вселенной, которая сжимается. Для нас далеко не безразлично, наступило ли это сжатие после расширения или началось с какого-то статического состояния, когда не было ни того, ни другого.

Рассмотрим первый случай. Он может быть для нас одновременно далеким прошлым и далеким будущим, если только $\rho > \rho_{кр}$. Вот начинает замедляться расширение нашей Вселенной, галактики замедляют свой бег,

красное смещение убывает. Но мы не сразу заметим это: ведь свет имеет конечную скорость. Дальние галактики и квазары уже перестали удаляться от нас и начали приближаться, но мы продолжаем наблюдать в их спектре красное смещение, и лишь через миллиарды лет оно сместится в фиолетовый. Сначала мы заметим изменения в спектре ближайших галактик*), потом все более и более далеких. Но дело не ограничится сдвигом спектральных линий в другую сторону — последствия фиолетового смещения будут куда более значительными.

Изменится спектральный состав излучения далеких галактик и квазаров. Видимые лучи превратятся в ультрафиолетовые, инфракрасные лучи — в видимые. Плотность излучения во Вселенной начнет сперва медленно, а потом все быстрее нарастать. Фактор ослабления в $(1+z)^2$ раз, о котором мы писали на стр. 297, превратится в фактор усиления во столько же раз, т. е. блеск всех космических объектов увеличится (при тех же z) в $(1+z)^4$ раз. Особенно усилится блеск далеких объектов, которых к тому же очень много. Их суммарный блеск окажется настолько заметным, что ночное небо станет сперва серым, а потом все более и более ярким. Ведь излучать в видимом свете будут и все холодные объекты, которые сейчас испускают лишь инфракрасные лучи: холодные звезды, планеты, далекие пылевые туманности. Наконец небо станет столь же ярким, как Солнце, и солнечный диск с трудом будет различаться на его фоне.

Описанное явление носит название фотометрического парадокса (парадокса Ольберса). Оно сводится к тому, что в бесконечной Вселенной суммарное излучение звезд и галактик должно создавать равномерное свечение всего неба с яркостью почти такой же, как у Солнца (эта яркость зависит от средней температуры звезд во Вселенной). Мы не наблюдаем парадокс Ольберса в значительной степени благодаря красному смещению, которое переводит излучение далеких объектов в невидимую для нас инфракрасную область. Но если расширение сменится сжатием, то все будет наоборот.

Когда плотность излучения достигнет такого предела, что каждая звезда будет получать извне столько же энер-

*) Автор здесь проводит так называемый мысленный эксперимент. В действительности даже за тысячи лет никаких изменений заметить не удастся.

гии, сколько она сама вырабатывает, наступит грандиозная серия катастроф: звезды начнут взрываться, ибо им некуда будет отводить энергию (точнее, приток энергии превысит отток). Еще раньше от губительной коротковолновой радиации погибнет все живое на тех планетах, где существовала жизнь. Возможно, что некоторые цивилизации попробуют спастись, зарывшись в землю или оградив себя прочными экранами от наступающей радиации. Но это спасет их ненадолго. Под действием все растущих потоков излучения экраны испарятся, а затем обратятся в пар и планеты — обиталища жизни. Наконец все вещество превратится в диффузную материю. А дальше процесс пойдет по Зельдовичу — Новикову до самого «Большого Взрыва».

Ну, а если бы было однократное сжатие из стационарного состояния? Тогда все зависит от начального состояния материи. Если оно диффузное, то звезды попросту не смогут образоваться, потому что для образования протозвезд нужна низкая температура (см. стр. 204), а здесь по мере сжатия температура будет повышаться. Отсутствие звезд устранил на время фотометрический парадокс, но только на время. Ведь все равно по мере сжатия плотность энергии излучения будет расти за счет столкновений частиц. На известном этапе разрушатся атомы, потом атомные ядра, останутся лишь барионы и другие элементарные частицы. Конец этапа сжатия тот же: рождение пар, колоссальный рост температуры и плотности, взрыв.

Нет, не советуем никому жить в сжимающейся Вселенной. И тот факт, что мы с вами, читатель, живем именно в расширяющейся Вселенной, не случаен. Мы потому и смогли обрести жизнь, что Вселенная расширяется. И, по видимому (здесь нельзя пока еще быть уверенным на 100 процентов), она будет расширяться беспредельно. Потому что $\rho < \rho_{кр}$. А значит, сжатие и все связанные с ним ужасные события нам не угрожают.

От атомов до млечных путей

Вернемся теперь к той стадии расширения нашей Вселенной, на которой мы ее оставили, и посмотрим, по необходимости бегло, как пойдет развитие дальше. Мы остановились на том периоде, когда температура излучения понизилась настолько, что ядра водорода и гелия начали захватывать электроны и превращаться в нейтральные атомы. Конечно, часть из них еще оставалась в виде ядер или ионов,

причем процессы ионизации и рекомбинации шли одновременно, отчасти уравновешивая друг друга. Но из-за понижения температуры как газа, так и излучения ионизация происходила все реже, а захваты электронов — все чаще.

Материя в расширяющейся Вселенной не могла быть распределена строго однородно и изотропно. Это понимали советские теоретики и давно уже начали разрабатывать теорию неоднородной анизотропной Вселенной. Такую теорию развивает, например, известный космолог А. Л. Зельманов. Его теория должна объяснить общие свойства неоднородной Вселенной.

Ну, а если говорить не об общих свойствах, а о частных, хотя и очень важных процессах? Как, например, возникли галактики и квазары?

Теорию образования галактик при расширении Вселенной за счет развития метагалактической турбулентности разрабатывают, начиная с 1967 г., Л. М. Озерной и А. Д. Чернин. Мы уже не раз говорили о роли турбулентности в образовании небесных тел. Но здесь этот процесс выступает в несколько иной форме.

Озерной и Чернин исходили из гипотезы, что при любом взрыве движения среды не могут быть строго радиальными. Непременен возникнут (за счет разности скоростей, трения и других факторов) и вихревые движения. Поскольку на ранней стадии расширения материя представляет собой некую смесь, «кашу» из вещества и излучения, Л. М. Озерной назвал эти вихри фотонными вихрями, а самый процесс — фотонной турбулентностью.

В самом деле, из-за большой плотности вещества длина свободного пробега излучения здесь так мала, что оно оказывается вовлеченным в вихревые движения вещества.

Когда с понижением температуры вещество из состояния плазмы переходит в состояние нейтрального газа, резко падает скорость звука в этой среде *), т. е. скорость передачи возмущений. Скорости движения среды, которые были раньше дозвуковыми, становятся сверхзвуковыми. Это порождает образование скачков уплотнения и сильных флуктуаций плотности. Л. М. Озерному и его сотрудникам удалось показать, что при этом должны образоваться гравитационно связанные, устойчивые сгущения — будущие галактики. Продолжая исследование, они смогли вывести основные параметры галактик: соотношения их радиуса и

*) См. стр. 266.

удельного момента вращения с массой, время их гравитационного обособления. Согласно гипотезе Л. М. Озерного и Г. В. Чибисова, спиральные галактики появлялись в участках среды с преимущественно вихревыми движениями, а эллиптические — в участках с преобладанием спокойных движений в общем поле тяготения. Исходя из той же идеи турбулентности, но рассматривая вихри разного масштаба, Озерной и его сотрудники пришли к выводу, что шаровые звездные скопления возникли за счет вихревых движений в самих галактиках (по той же схеме: вихри — флуктуации плотности — гравитационно обособленные объекты), а скопления галактик — за счет сравнительно слабых возмущений плотности больших масштабов.

Независимо от Л. М. Озерного гипотезу о возникновении галактик за счет крупномасштабной турбулентности предложил в 1970 г. известный голландский астрофизик Я. Оорт. По его расчетам протогалактики возникли, когда все масштабы во Вселенной были в 30 раз меньше современных, т. е. примерно через 500 миллионов лет после начала расширения. Образование различных типов галактик, по Оорту, происходило по истечении первого миллиарда лет. В этот период происходило, в частности, наиболее интенсивное образование радиогалактик.

А как же возникли квазары? Для этого надо яснее представить себе, что собой представляет типичный квазар, какое место они занимают в ряду внегалактических объектов. Сейчас по этому вопросу нет единого мнения. Ясно лишь, что квазары, расположенные от нас на очень больших космологических расстояниях, — самые молодые из внегалактических объектов. Возникла даже гипотеза, что квазары — это сгустки первичного раскаленного и плотного вещества, задержавшегося в своем расширении под действием каких-то сил. Так это или нет — покажут будущие исследования.

А теперь настала пора нам проститься с галактиками и квазарами, с Метагалактикой и нашей Вселенной. Мы выяснили, как развивались представления об их возникновении и эволюции, какие взгляды существуют и разрабатываются в наше время. Нелегкая задача, которую перед собой поставил автор, выполнена. Хорошо или плохо — пусть судят читатели.

527

Б 88

УДК 523

Виталий Александрович Бронштейн

ГИПОИЗЫ О ЗВЕЗДАХ И ВСГЛЕННОМ

М., 1974 г., 384 стр. с илл.

Редактор *Г. С. Куликов*

Техн. редактор *И. Ш. Аксельрод*

Корректор *Т. С. Плетьева*

Сдано в набор 6/III 1973 г. Подписано к печати 26/III 1974 г. Бумага 81×108¹/₃₂,
тип № 2 Физ. печ. л. 12. Услови. печ. л. 20,16. Уч.-изд. л. 21,38. Тираж 30 000 экз.
Т-20813. Цена 77 к. Заказ № 1161.

Издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли, 197136, Ленинград, П-136, Гагчинская ул., 26

Б $\frac{20605--054}{053(01)-74}$ 191-74

© Издательство «Наука», 1974