



В. БОРИСОВ

ЗАГАДКА ТЯГОТЕНИЯ

НАРОДНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
КУЛЬТУРЫ

10

1963

НАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ КУЛЬТУРЫ

В. БОРИСОВ

ЗАГАДКА ТЯГОТЕНИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1963

В книжке изложены современные представления о тяготении. Читатель познакомится с опытными фактами и идеями, лежащими в основе теории относительности. В книжке рассказывается также о некоторых спорных и еще неразрешенных до конца проблемах, которые волнуют физиков.

Что считать в науке загадкой?

(ПРЕДИСЛОВИЕ)

Развитие физики, как и других естественных наук, происходит сейчас необычайно бурно. Новые экспериментальные данные и новые теоретические построения появляются параллельно.

Гипотезы подтверждаются или опровергаются в опытах, развитие теории дает, в свою очередь, пищу для новых опытов. Основная особенность развития науки состоит в том, что ни на одном опыте, ни на одном открытом явлении оно не может остановиться. Ни одно явление не может поэтому до конца быть объяснено существующими теориями. «Точность» объяснения лимитируется точностью поставленных опытов и пределами применимости теории.

Интересно привести пример классической ошибки в оценке путей развития физики. В конце XIX в. известный английский физик лорд Кельвин сказал, что развитие современной физики в основном закончено, остались лишь два темных «пятнышка»: опыт Майкельсона (о нем мы расскажем в этой брошюре) и излучение черного тела. Насколько он ошибся, можно судить по тому, что из опыта Майкельсона «родилась» теория относительности, а излучение черного тела стало отправным пунктом для квантовой физики. Поэтому в науке вообще, и в физике в частности, каждое явление следует считать в какой-то мере загадкой, не разрешенной до конца.

Всемирное тяготение, или, как чаще говорят, гравитационное взаимодействие, занимает в физике особое место. Оно бы-

ло открыто по существу одновременно с электрическими явлениями, но теоретическая база под весьма небольшую группу известных гравитационных эффектов была подведена только в начале этого века. Трудность постановки гравитационных экспериментов, существенные трудности в построении теории тяготения привлекают в последнее время все больше физиков. Интерес к тяготению, играющему огромную роль в космических масштабах, возрос еще и в связи с выходом человека в космос.

В этой брошюре будет рассказано о современных взглядах на гравитационное взаимодействие, об опытах, которые уже поставлены физиками, и об опытах, которые еще будут поставлены.

Закон всемирного тяготения. Масса инертная и гравитационная

Мы начнем рассказ о гравитации с напоминания двух фундаментальных физических законов. Исааку Ньютону, основателю классической механики, принадлежит честь открытия закона всемирного тяготения. Этот закон в виде формулы можно записать так:

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2} .$$

Словесная формулировка закона так же проста, как и его математическая запись: сила притяжения между двумя телами пропорциональна их массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Добавим небольшое уточнение к этой формулировке: в такой форме закон справедлив для тел, размеры которых существенно меньше расстояния между ними. Если размеры двух тел сравнимы с расстоянием между ними, то для того, чтобы рассчитать силу притяжения, необходимо мысленно расчленить их на маленькие тела, вычислить силы притяжения между всеми маленькими телами и эти силы сложить.

Нужно обязательно подчеркнуть, что этот закон носит «всемирный» характер: сила притяжения возникает между любыми телами. На вопрос, откуда «появился» закон всемирного тяготения и нет ли явления более «простого», которое могло бы объяснить возникновение такого притяжения, можно ответить так: подобного явления пока не найдено, и закон носит чисто опытный характер.

Теперь обратимся к понятию массы, которая входит в закон всемирного тяготения. Массу можно определить, пользуясь самим законом: чем больше тела притягиваются, тем больше их массы. Можно с помощью этого закона ввести в физику новую единицу массы. Для этого нужно подобрать два таких одинаковых тела, которые на расстоянии в единицу длины (например, 1 см) притягивались бы с силой, равной единице (например, 1 г). Если бы такие тела можно было подобрать,

то гравитационную массу каждого из них можно было бы принять за единичную.

Для таких новых единиц массы в законе всемирного тяготения коэффициент пропорциональности k был бы равен единице. Однако при определении массы, входящей в закон Ньютона, физики столкнулись с известным затруднением: теперь оказалось необходимым различать два сорта масс. Дело в том, что, создавая основы механики, Ньютон ввел еще один «сорт» масс. Второй закон механики Ньютона формулируется так: ускорение, с которым движется тело, прямо пропорционально силе, приложенной к этому телу, и обратно пропорционально его массе. Причем прямо пропорционально любой силе (любого происхождения, а в частности, и гравитационной).

Таким образом, во второй закон механики входит еще одна масса. Ее называли инертной в отличие от гравитационной, входящей в закон всемирного тяготения.

Итак, у каждого тела оказались две массы. Одна из них проявляется, если на него подействовать какой-нибудь силой. Это инертная масса. Чем она больше, тем медленнее будет нарастать скорость тела, если действовать одной и той же силой. Вторая масса тела, гравитационная, проявится, если к этому телу приблизить другое: тела начнут притягиваться, и сила притяжения будет тем больше, чем больше гравитационные массы.

Обе массы одного и того же тела входят в разные законы. Оба закона — опытные и между собой ничем не связаны. Поэтому физики и попытались узнать, нет ли какой-либо связи между двумя сортами масс.

Гравитационная постоянная. Опыты Этвеша и Дике

Первым, кто попытался установить связь между массой инертной и гравитационной, был сам Ньютон. Его опыты были внешне необычайно простыми: он брал маятники одинаковой длины и с гирьками, выполненными из разных материалов, и измерял периоды их колебаний. Ход его рассуждений был прост: при колебаниях маятника на груз действует сила притяжения гравитационной массы Земли, которая стремится возвратить маятник в положение равновесия; однако эта сила вызывает, согласно второму закону, ускорение, которое зависит от массы инертной. Зная величину ускорения, можно определить и период колебаний. Несложный расчет приводит к тому, что период колебаний маятника зависит только от отношения массы инертной к массе гравитационной.

В результате опытов Ньютон убедился, что с достигнутой им точностью для всех тел, которые он опробовал, период ко-

лебаний маятника был один и тот же при прочих равных условиях. А это означало, что отношение массы инертной к массе гравитационной есть (с некоторой степенью точности) постоянная величина.

Этот весьма фундаментальный вывод связал два закона, два свойства тел — инерционное и гравитационное. Так как о законах, лежащих «глубже» (в основе) закона всемирного тяготения и второго закона механики, физикам пока ничего не было известно, то к этому опыту возвращались не раз, повторяя его со все большей и большей точностью.

Опыт Ньютона лег в основу общей теории относительности. Поэтому и в обычной формуле для закона всемирного тяготения и во втором законе Ньютона очень часто в учебниках и монографиях не делают в обозначениях различия между массой инертной и массой гравитационной.

В формулу, выражающую второй закон механики, обычно подставляют массу в граммах. Один грамм инертной массы — это масса одного кубического сантиметра дистиллированной воды, взятой при 4°. Этой же единицей массы пользуются и для вычисления силы гравитационного притяжения между двумя телами. Поэтому в закон всемирного тяготения входит постоянный множитель (в нашем выражении он обозначен через κ). Этот множитель зависит от найденного опытным путем отношения массы инертной к массе гравитационной и носит название гравитационной постоянной.

Гравитационную постоянную можно определить еще и как силу гравитационного притяжения между двумя массами, равными 1 г и разнесенными на расстояние 1 см. Эта сила весьма невелика: всего 0,000 000 0667 дины. Дина составляет 1/980 от грамма силы. Напомним, что грамм силы (обычно употребляемая в обиходе единица) — это сила, с которой 1 г массы притягивается к Земле, если его поместить на уровне моря и на широте 45°, т. е. грамм силы — это вес грамма массы.

Таким образом, мы подошли к основной причине, из-за которой явления, связанные с гравитационным взаимодействием, очень трудно наблюдать: дело в том, что эффект гравитационного притяжения весьма слаб.

Мы указали силу взаимного притяжения между двумя массами по 1 г на расстоянии в 1 см. Вот еще один пример: два взрослых собеседника, сидящие за столом, притягиваются друг к другу с силой в 0,00004 г силы. Столько весит (с такой силой притягивается к Земле) человеческий волос длиной в 10 см.

Значительный вес окружающих нас в быту предметов объясняется огромной массой Земли: $6 \cdot 10^{27}$ г. Поэтому гравитационные опыты в лабораторных условиях ставить необычайно трудно, и до сих пор значительное число явлений, предсказанных теорией, не удалось обнаружить. В слабости гравитационного взаимодействия и лежит причина того, что в некоторых

отношениях гравитацию еще можно считать загадкой. Интересно, что по сравнению с иными видами взаимодействий — электрическим, магнитным, ядерным и другими — гравитационное взаимодействие является своего рода рекордистом по «слабости».

Вернемся к опытам, поставленным Ньютоном. Как мы уже говорили, физикам было очень существенно узнать, сохраняется ли для всех тел и с любой точностью постоянство отношения массы инертной к массе гравитационной. Интерес к этому вопросу живет до сих пор, и опыты продолжаются и по сей день. Наибольшей точности в конце XIX в. по измерению постоянства отношения массы инертной к массе гравитационной добился один из виднейших экспериментаторов того времени — венгерский физик барон Роланд фон Этвеш. Имя Этвеша присвоено университету в Будапеште. По его измерениям отношение двух сортов масс для разных тел если и изменяется, то не более чем в $5 \cdot 10^{-9}$ части (пять миллиардных долей). Этот эксперимент повторялся и другими физиками; в частности, удалось выяснить, что и для радиоактивных изотопов отношение не изменяется.

Через 60 лет после Этвеша, в 1961 г., этот опыт заново поставил известный современный экспериментатор профессор Принстонского университета (США) Р. Дике. При постановке опыта он использовал достижения современной электроники и вакуумной техники. Схема опыта была проста: представим себе два груза одинаковой массы, укрепленных на коромысле. Вещества, из которых изготовлены грузы, — разные. Коромысло висит на очень тонкой проволоке, закрепленной в его середине (крутильный маятник). Специальное радиоэлектронное устройство может регистрировать малые крутильные колебания такого маятника с размахом в 10^{-7} см — в одну стомиллионную долю сантиметра! Вся система помещается в вакуум 10^{-6} мм ртутного столба (примерно одна миллиардная доля атмосферного давления). Установка находится в шахте на глубине 4 м. Шахта закрыта специальной тепловой пробкой, чтобы незначительное изменение температуры не могло раскачать маятник. Оператор, который достаточно удален, получает информацию о колебаниях маятника и может успокоить или раскачать его с помощью системы дистанционного управления.

Таким образом, было использовано довольно многое из того, что дает современному экспериментатору радиоэлектроника. Идея опыта состояла в том, что притяжение Солнца (если массы, прикрепленные к коромыслу, имеют разное отношение гравитационной массы к инертной) должно «развернуть» крутильный маятник. Такой эффект должен был повторяться раз в сутки, если учесть, что Земля вращается вокруг собственной оси. Измерения продолжались несколько месяцев,

но Дике не обнаружил такого эффекта с точностью до $1 \cdot 10^{-10}$. Иными словами, с такой точностью отношение массы инертной и гравитационной сохраняется постоянным.

Сравнивая результаты опытов Этвеша и Дике, видно, что Дике удалось только в 50 раз (после 60 лет бурного развития физики!) увеличить точность измерений. На первый взгляд, это немного. По мнению профессора Принстонского университета, тело самого Этвеша за счет гравитационного притяжения должно было повлиять на результат измерений так, что на самом деле ему не удалось достигнуть точности в $5 \cdot 10^{-9}$.

Эксперименты, которые проводятся в Принстонском университете, продолжают и по сей день. Возможно, авторам удастся повысить точность старого результата или доказать, что на какую-то весьма малую долю (меньшую, чем одна 10^{-10}) отношение массы инертной к массе гравитационной изменяется. Второй результат, как мы это увидим дальше, должен будет заставить физиков сильно изменить свои представления о тяготении.

Можно ли экранироваться от тяготения?

После того как закон всемирного тяготения был сформулирован и экспериментально подтвержден в лабораторных условиях (первый, кому это удалось сделать, был английский физик Кавендиш), физиков стало интересовать, не приближенна ли такая формулировка, нет ли необходимости вводить поправку на влияние среды, находящейся между двумя телами.

Выпишем рядом математические формулы двух законов, очень сходных по «внешнему» виду: закон всемирного тяготения и закон Кулона для электрических зарядов:

$$F_{\text{гр}} = \kappa \frac{m_1 m_2}{r^2}; \quad F_{\text{эл}} = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}.$$

Закон Кулона формулируется почти так же, как и закон всемирного тяготения: сила взаимного притяжения или отталкивания двух электрических зарядов прямо пропорциональна величине зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними; если заряды одноименные, то они отталкиваются, если разноименные — притягиваются. Таким образом, гравитационные массы, входящие в закон Ньютона, можно назвать, по аналогии с законом Кулона, гравитационными зарядами.

Первое существенное различие в формулировках законов состоит в том, что гравитационные тела все без исключения притягиваются, причем притягиваются в равной мере, т. е. пропорционально их инертной массе. Электрический заряд у тела с одной и той же массой может быть произвольный, и

свойство электрического притяжения не связано с массой тела. Второе различие состоит в том, что на силу электростатического притяжения влияют свойства вещества, помещенного между зарядами (влияет промежуточная среда). Это влияние учитывается коэффициентом ϵ , который носит название диэлектрической постоянной вещества.

Диэлектрическая постоянная — это хорошо известная характеристика вещества, которая тем больше, чем свободнее могут перемещаться в веществе под воздействием внешних электрических зарядов элементарные заряды (электроны, протоны, ионы). В любом физическом справочнике можно найти значение величины ϵ для многих веществ. Чем больше ϵ , тем слабее взаимное притяжение. Металл (проводник) обладает бесконечно большой диэлектрической проницаемостью, иными словами, он ослабляет до нуля электрическое притяжение (экранирует заряды).

Сравнивая закон Ньютона и закон Кулона, физики поставили вопрос, а не следовало бы учитывать хотя бы в небольшой степени влияние промежуточной среды на гравитационное взаимодействие, не нужно ли ввести в знаменатель формулы закона множитель, который зависит от свойств среды между телами? Быть может, для некоторых веществ это влияние будет существенно и удастся в какой-то степени экранироваться от тяготения.

Перспектива, заманчивая и в техническом отношении, сулила пролить свет на природу тяготения. Были поставлены многочисленные опыты и в лабораторных условиях, и при астрономических измерениях. Все опыты дали отрицательный результат. Исключение составил опыт итальянского физика Майораны, которому якобы удалось обнаружить в девятом знаке (в 10^{-9} части) влияние среды на гравитационное взаимодействие. Однако его результат не подтвердился. Сейчас физики уверены на основании опытных данных, что, по крайней мере, до десятого знака (т. е. до одной десятой доли от одной миллиардной части) сила взаимного притяжения между телами при внесении промежуточного тела не изменяется.

Варианты опытов по обнаружению влияния промежуточной среды на гравитационное взаимодействие были самыми различными. В одном из лабораторных вариантов использовались специальные весы, которые могли зафиксировать весьма незначительные изменения веса. Под одну из масс, входящую в весы, вводилась стальная двухсоткилограммовая плита, которая должна была «экранировать» эту массу от Земли. Специальное устройство учитывало, конечно, и притяжение массы к самой плите. При массе в 10 кг (она притягивалась к Земле с силой около 10^{+7} дин) весы могли бы обнаружить изменение веса в 10^{-3} дины.

В другом, астрономическом варианте этого опыта исполь-

зовался гравиметр. Это геофизический прибор, представляющий собой также весьма чувствительные весы; он позволяет измерять очень малые изменения силы тяжести. С его помощью геофизики определяют неравномерности в распределении масс в земной коре, что существенно помогает при георазведке. Особенно часто гравиметры используют при нефте-разведке. В последнее время интерес к гравиметрической разведке усилился в связи с определением траекторий искусственных спутников Земли и баллистических ракет.

Гравиметр может фиксировать и изменение веса тела на Земле, связанное с притяжением Луны и Солнца. Идея опыта состояла в том, чтобы во время солнечного затмения, когда Земля, Луна и Солнце на короткое время находятся на одной прямой, попытаться заметить какое-либо изменение веса. При таком положении Луна закрывает Солнце от земного наблюдателя; не сыграет ли Луна роль экрана и для силы притяжения груза в гравиметре к Солнцу? И в этом варианте результат опыта был отрицательным.

Законы движения планет. Поведение перигелия Меркурия

Закон всемирного тяготения и законы механики Ньютона позволили Кеплеру сформулировать законы движения планет вокруг Солнца. Подтверждение законов Кеплера в астрономии стало по существу подтверждением закона всемирного тяготения. В законах Кеплера не учитывалось влияние планет друг на друга, а рассматривалась только задача двух тел: планеты и Солнца. Поэтому, вычисляя точные орбиты планеты, астрономы вводили поправки к законам Кеплера, учитывая с помощью закона всемирного тяготения возмущающее влияние соседних планет. Наблюдая с помощью телескопов орбиты планет и сверяя их с расчетными, астрономы проверяли, с одной стороны, свои вычисления, а с другой, справедливость закона Ньютона в космических масштабах. Причем нужно отметить, что проверка шла с очень хорошей степенью точности. Все расчеты были в согласии с законом до тех пор, пока дело не дошло до Меркурия — ближайшей к Солнцу планеты. Меркурий обладает отличительной особенностью по сравнению с другими планетами: эллипс, по которому он движется, более вытянут, чем, например, у Земли, Венеры.

Изучая поведение орбиты Меркурия в 1845 г., астроном Леверье отметил, что перигелий эллипса не остается неподвижным, а перемещается по кругу со скоростью около 43 угловых секунд за 100 лет. Напомним, что перигелий — это ближайшая к Солнцу точка эллипса. Таким образом, эффект

очень незначителен, но все же он не укладывается в рамки закона всемирного тяготения.

Для того чтобы как-то объяснить эту деталь, явно не укладывающуюся в стройную картину движения небесных тел, строго следующих закону Ньютона, были предложены разные объяснения. В частности, было (с существенной натяжкой) предположено, что это возмущение вызвано так называемым «Зодиакальным светом» — газовым облаком, вращающимся вблизи Солнца. Правда, при этом пришлось предполагать, что масса этого облака весьма значительна. Так или иначе, эта аномалия в поведении Меркурия оставляла у физиков чувство неудовлетворения.

Через 70 лет после открытия Леверье появилась новая физическая теория, созданная одним из величайших физиков современности Эйнштейном, — общая теория относительности. В теории относительности эти 43 угловые секунды, «лежавшие на совести у Меркурия», получались на основании строгого расчета без каких-либо дополнительных предположений. Общая теория относительности включила в себя и закон всемирного тяготения Ньютона как приближение более точного.

Основные принципы теории относительности.

Отклонение луча света Солнцем

Попытаемся в самых общих чертах рассказать о теории относительности Эйнштейна. Эта наука, включающая в себя значительную часть современных физических представлений о строении мира, продолжает развиваться и по сей день.

Теория относительности включает в себя две части: специальную теорию относительности и общую теорию относительности. Последнюю иногда называют теорией тяготения. Для последовательности изложения начнем наш рассказ с основных принципов специальной теории относительности, которая не имеет прямого отношения к тяготению.

Напомним сначала одно простое физическое явление. Представим себе какой-то источник звуковых колебаний, например детскую хлопушку, и двух наблюдателей. Первый наблюдатель имеет очень хорошие часы и находится рядом с хлопушкой. А второй, тоже с хорошими часами, которые предварительно сверили с первыми, может передвигаться в любых направлениях и с любой скоростью. Пусть в начале опыта оба наблюдателя были неподвижны, между ними было 340 м^3 спокойного воздуха. Скорость распространения звука в воздухе 340 м/сек . Это означает, что если первый наблюдатель хлопнул хлопушкой, то второй услышит хлопок через 1 сек .

Теперь представим себе, что второй наблюдатель в момент

хлопка начал двигаться навстречу первому со скоростью 340 м/сек. Это значит, что его уши встретили бы сжатие и разрежение воздуха — звук от хлопка — вдвое раньше, т. е. через 0,5 сек. Такой же результат был, если бы второй наблюдатель сидел на месте, но воздух между наблюдателями двигался с огромной скоростью — в 340 м/сек — от первого ко второму. И в этом случае хлопок достиг бы ушей второго наблюдателя за 0,5 сек.

Как видите, в этом простом примере есть два наблюдателя и среда (воздух), в которой распространяется сигнал. Среда может перемещаться независимо от наблюдателей, а результат опыта, т. е. время распространения сигнала, зависит как от скорости движения среды относительно одного наблюдателя, так и от скорости движения второго наблюдателя относительно среды.

В этом опыте все просто и понятно. Примерно такую же картину физики ожидали увидеть и при распространении световых сигналов от наблюдателя к наблюдателю. Правда, наблюдать этот эффект было значительно труднее, так как скорость распространения света 300 000 км/сек. Однако выход был найден. Эффект увлечения сигнала движущейся средой должен был наблюдаться в оптических приборах — интерферометрах.

Дело в том, что Земля движется вокруг Солнца со скоростью около 30 км/сек. Это очень большая скорость. И вот физики рассчитали, по аналогии с опытом со звуком, что при такой скорости движения Земли в интерферометре должно быть четко заметно «увлечение» светового луча средой. Этой среде было дано специальное название — эфир. Если поворачивать интерферометр так, что лучи света в нем будут иметь разную ориентацию по отношению к направлению движения Земли, то эффект увлечения должен будет увеличиваться или уменьшаться.

Опыт был поставлен с большой тщательностью и неоднократно повторялся. Последнее его повторение относится к 1959 г. По имени первого физика, поставившего опыт, ему дали название опыт Майкельсона. Но... мы не сказали самого главного: опыт дал отрицательный результат. Никакого движения Земли относительно мирового эфира не было обнаружено.

Это вызвало смятение в умах физиков. Появился целый ряд гипотез, которые пытались свести концы с концами, появилось довольно много повторений этого опыта. А результат был все тем же — никакого движения относительно среды, в которой распространяется свет, обнаружено не было. С этого момента в истории физики и началась новая глава — специальная теория относительности, написанная великим ученым нашего столетия Альбертом Эйнштейном.

Теоретическое построение Эйнштейна после того, как оно становится понятным, кажется необычайно простым и естественным. Попытаемся осветить основные идеи Эйнштейна, лежащие в основе специальной теории относительности, связав их в основном с вопросом о времени.

Эйнштейн рассуждал примерно так: если мы не можем обнаружить с помощью световых сигналов движения относительно мирового эфира, то значит, нет такой системы отсчета (такого наблюдателя), которая могла бы считаться абсолютно неподвижной. Отсюда следовал естественный вывод, что все системы отсчета (наблюдатели), движущиеся друг относительно друга, совершенно равноправны. Нельзя отдать предпочтения какому-нибудь одному из них. К чему приведет такое заключение?

Если все наблюдатели равноправны, то каждый из них, измерив скорость распространения света, получит одно и то же число. Скорость света у всех наблюдателей будет одна и та же. С этого места и начинаются парадоксы теории относительности.

Поставим такой мысленный эксперимент. Пусть один из наблюдателей находится в конце вагона длиной 1 км, который движется со скоростью 1 км/сек. Второй наблюдатель находится на неподвижной платформе. Предположим, что в тот момент, когда наблюдатели поравняются, они одновременно включают на очень короткое время карманные фонари. Наблюдатель, сидящий в вагоне, скажет, что, с его точки зрения, свет дойдет до противоположной стенки вагона за $1/300\,000$ сек, так как в его «вагоне» (в его системе отсчета) скорость света равна 300 000 км/сек, а длина вагона 1 км. Наблюдатель с платформы скажет, что свет от его карманного фонарика дойдет до стенки вагона несколько позже, а именно за $1/299\,999$ сек, так как, с его точки зрения, стенка вагона «уходит» со скоростью 1 км/сек и световому сигналу придется ее «догонять».

Но фонари у обоих наблюдателей совершенно равноправны, они находились рядом, когда были включены. Таким образом, наблюдатели в вагоне и на платформе не смогут договориться. С их точек зрения, световые сигналы дойдут до стенки вагона неодновременно.

Как же выйти из этого парадокса? Если мы попытаемся отдать предпочтение одному из наблюдателей или кому-нибудь третьему и будем говорить, что один из наблюдателей ошибается, потому что не знает, что он движется, то тем самым мы создадим избранную, «неподвижную» систему отсчета, существование которой запрещается опытом Майкельсона.

Эйнштейн обратил внимание на то, что физики неточно пользовались понятиями интервала времени и отрезка длины. Среди физиков бытовало представление, что время и расстоя-

ние — эти основные характеристики пространства — неизменны вне зависимости от скоростей движения наблюдателя. Это представление о неизменности пространства — времени считалось само собой разумеющимся и никакими специальными доказательствами не было подтверждено. Считалось, что если расстояние от одного наблюдателя до какого-нибудь предмета равно x , то для другого наблюдателя, движущегося относительно первого со скоростью v , расстояние до этого же предмета будет через t секунд $x^1 = x - vt$. Переход от системы отсчета первого наблюдателя (x) к системе отсчетов второго наблюдателя (x^1) называется преобразованием координат.

Эйнштейн показал, что при таком переходе уравнения электродинамики меняют свой вид. Это означало, что законы электродинамики в движущейся системе координат (например, хорошо известный закон Кулона для электростатического притяжения) становятся другими. Иными словами, переход от одной системы отсчета к другой по правилу $x^1 = x - vt$ приводит к противоречию с основным принципом равноправия всех систем отсчета, движущихся равномерно.

В частности, заметим, что и скорость света, которая входит в электродинамические уравнения, при таком переходе тоже изменялась. Но принцип равноправия всех систем отсчета был подтвержден опытом Майкельсона. Значит, правило преобразования координат $x^1 = x - vt$ неверно. Довольно быстро было найдено такое преобразование, при котором уравнения электродинамики не изменяют своего вида, т. е. при котором разные системы координат остаются равноправными. Они имеют немного более сложный вид:

$$x = \frac{vt^1 + x^1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad t = \frac{\frac{v}{c^2}x^1 + t^1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

В этих формулах c — скорость света.

Только такое преобразование и удовлетворяет принципу равноправия систем координат (принципу относительности).

Из этих правил, как из рога изобилия, посыпались необычайные на первый взгляд выводы. Оказалось, что отрезок длины и отрезок времени между двумя событиями, измеренные в разных системах отсчета, различны. Отрезки длины с ростом скорости сокращаются, а время между двумя событиями увеличивается. Причем эти изменения происходят с точки зрения неподвижного наблюдателя, изучающего явления в движущейся системе. Движущийся наблюдатель не замечает в своей системе отсчета никаких изменений. А кто из них прав? Этот вопрос не имеет смысла, потому что как только мы отда-

дим предпочтение одному из них, мы сразу создадим, таким образом, избранного наблюдателя, который может считаться наиболее неподвижным. А это противоречит опыту Майкельсона и принципу относительности.

Таким образом и был разрешен парадокс с наблюдателями в вагоне и на платформе: единицы времени и единицы длины у них были разными, и это различие появилось только из-за того, что один из них двигался относительно другого.

Как видно из приведенных формул, пока v много меньше c , приближенно можно считать $t \approx t'$; $x' \approx x - vt$. Но при больших v такое приближение недопустимо. Может создаться впечатление, что специальная теория относительности (а ей уже насчитывается более 50 лет от роду) применима только к электромагнитным явлениям и является, некоторым образом, следствием выбранного способа измерения расстояния и отрезков времени с помощью электромагнитных сигналов.

Сейчас существует множество опытных фактов, относящихся к самым разнообразным физическим явлениям, точно укладывающихся в теорию относительности, и нет ни одного, который бы ей противоречил. Физикам, исследовавшим элементарные частицы, хорошо известно, что одни из элементарных частиц, так называемые мю-мезоны, живут недолго. Время жизни покоящихся мю-мезонов составляет примерно две миллионные доли секунды; но если измерить время жизни этих же мю-мезонов, родившихся в космических лучах и имеющих скорость, близкую к скорости света, то приборы, покоящиеся относительно Земли, покажут значительное возрастание времени их жизни. Этот пример говорит о том, что дело не в способе измерения, и эффекты специальной теории относительности проявляются не только в электромагнитных явлениях.

Таким образом, изменение масштаба времени в движущейся системе — общий закон для всех физических процессов.

Как мы видели, интервал (отрезок) времени зависит от того, в какой системе отсчета было произведено измерение. Физики говорят, что интервал времени не является инвариантом, т. е. постоянной величиной. Этим выводом теория относительности опрокинула представление о том, что время течет независимо от физических процессов, протекающих во времени. Огромная заслуга теории относительности не только перед физикой, но и перед материалистической философией состоит, таким образом, в том, что она показала, что физические явления нельзя отрывать от свойств пространства и времени, что нельзя рассматривать отдельно свойства пространства и времени от физических явлений, в них протекающих.

Отметим еще одно интересное обстоятельство. Как вы видели, преобразование времени при переходе от одного наблюдателя к другому при их взаимном движении приводит к из-

менению масштаба времени. Это означает, что можно привести такие примеры реальных физических явлений, которые, будучи одновременными в одной системе отсчета, не будут одновременными в другой. При этом точный расчет показывает, что нарушение одновременности событий никогда не может привести к нарушению принципа причинности.

Основой принципа причинности является последовательность во времени причины и следствия. Оказывается, что для реальных физических процессов с точки зрения теории относительности всегда физическое явление, являющееся причиной, предшествует физическому явлению — следствию. И никакими переходами к другим системам отсчета (другим наблюдателям), при которых сильно изменяется одновременность событий, нельзя переставить местами во времени причину и следствие.

Если говорить об изменении масштаба времени, следующего из специальной теории относительности, в движущейся системе отсчета, то под этим следует понимать изменение ритмов идеальных часов, т. е. таких часов, на которые не могли бы повлиять предварительные ускорения, тряска, связанные с набором скорости, и другие причины.

Иными словами, если бы пришлось ставить такой опыт прямо, наблюдая изменение хода хорошего хронометра в каком-либо быстродвижущемся экипаже, с некоторой неподвижной по отношению к экипажу платформы, то пришлось бы долго устранять всякого рода технические влияния на ход часов, вызванные движением экипажа. То изменение ритма часов, которое нельзя будет устранить никакими техническими ухищрениями, и будет эффектом специальной теории относительности.

Как уже отмечалось, для привычных нам скоростей этот эффект изменения хода времени невелик, потому что обычные для нас скорости макроскопических тел много меньше скорости света.

Приведем в качестве примера результат мысленного опыта, который мог быть поставлен (в принципе, конечно) во время полета нашего замечательного космонавта Андрияна Николаева. Предположим, что на борт космического корабля «Восток-3» были поставлены очень точные часы и точно такие же часы были оставлены на Земле. Часы, летавшие в космосе, имели скорость относительно находившихся на Земле около 8 км/сек и, следовательно, в соответствии со специальной теорией относительности должны были идти медленнее. Подставляя вместо v скорость «Востока-3» и вместо c — скорость света, получим, что за время полета, равное 4 суткам, часы на космическом корабле должны были бы отстать на $0,00012 \text{ сек.}$ Отстали бы не только часы: все ритмы в организме космонавта тоже замедлились бы в такой же пропорции, т. е., вернувшись

на Землю, идеальный космонавт в таком эксперименте «помодел» бы по сравнению с идеальными земными наблюдателями на такую же долю секунды.

Как видите, этот эффект для достигнутых скоростей весьма невелик. Конечно, следует учесть, что в расчете рассматривались идеальные часы и идеальный космонавт, т. е. не учитывалось влияние ускорений и трение при выводе на орбиту и спуске на Землю, не учитывалось воздействие невесомости, изменение температуры и давления и т. д.

Кроме изменения масштабов длины и времени, из специальной теории относительности следовал и другой удивительный факт: инертная масса движущегося тела должна была со скоростью возрастать. Формула, выражающая этот эффект, выглядит так:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

В этом соотношении m_0 — инертная масса тела в покое, а m — масса при скорости v . Как видно из формулы, при скорости v , стремящейся к скорости света c , инертная масса тела m стремится к бесконечности. Иными словами, при больших v (близких к c) придется прикладывать к телу очень большие силы, чтобы получить существенное изменение v . Если скорость тела v существенно меньше скорости света c , то масса движущегося тела незначительно отличается от массы покоящегося. Например, при $v = 3$ км/сек поправка к массе составляет всего 10^{-10} часть. Этот вывод Эйнштейна о возрастании массы со скоростью был прекрасно подтвержден на опытах с элементарными частицами (электронами, протонами), которые разгонялись в ускорителях до больших скоростей.

Отметим, что и в этом явлении мы имели дело с теорией относительности: масса движущегося тела возрастала с точки зрения «неподвижного» наблюдателя, мимо которого пролетает тело.

Как мы видели, специальная теория относительности охватила группу явлений, связанных с движением с постоянными скоростями. А что же будут видеть наблюдатели, если движение будет не равномерно? Не изменятся ли свойства пространства вблизи материальных тел? На эти вопросы во многом удалось ответить созданной Эйнштейном (через одиннадцать лет после специальной теории относительности) общей теорией относительности.

Математический аппарат общей теории относительности значительно сложнее, чем в специальной. Мы попытаемся изложить только общие идеи, на которых она базируется. В основном общая теория относительности посвящена исследова-

нию вопроса о том, как влияет вещество (точнее, его гравитационные свойства) на свойства пространства.

Логика рассуждений Эйнштейна была приблизительно такой: для всех тел отношение массы инертной к массе гравитационной одно и то же, следовательно, сообщив какому-либо телу скорость в поле тяготения Солнца, мы увидим его движение по орбите, не зависящее от того, какое тело мы выберем. Поэтому можно говорить, что пространство вокруг Солнца (или любой другой гравитационной массы) искривлено. Изучать гравитационное поле означает изучать свойства искривленного пространства. Теория должна была не только дать ответ, по каким траекториям будет двигаться тело в гравитационном поле, но и, как это было сделано в специальной теории относительности, показать, как изменяются масштабы длины, времени (как говорят физики, изменяется метрика пространства). И такая теория была разработана Эйнштейном. Она включила в себя закон Ньютона как приближение.

Один из первых ее выводов давал ответ на самый простой вопрос: что должно произойти с массой гравитационной для быстро движущегося тела, у которого инертная масса заметно увеличилась? Оказалось, что нельзя просто считать, что обе эти массы возрастают одинаково, а необходимо пользоваться строгим расчетом. Это «место» в теории оказалось очень легко проверить по поведению перигелия Меркурия. Общая теория относительности дала точную цифру: перигелий должен вращаться со скоростью 43 сек. в столетие. Совпадение с опытом было прекрасное (ошибка лежала в пределах точности измерений и не превышала 2%). Это был первый триумф новой теории. Она объяснила явление, которое никак не укладывалось в рамки закона всемирного тяготения в той форме, которую ему придал Ньютон.

Заметим, что общая теория относительности не отвергает закона Ньютона, а показывает, что в такой форме можно описать только «грубые» эффекты тяготения, что этот закон приближенный и поэтому не может объяснить более тонкие явления.

В 1919 г., через три года после опубликования общей теории относительности, теория получила еще одно подтверждение. Было измерено отклонение луча света от далекой звезды, проходящего около края солнечного диска. Оказалось, что гравитационное поле Солнца заметно отклоняет луч света. Согласно Эйнштейну, это отклонение должно составлять 1,75 угловой секунды. Данные измерений первых двух экспедиций (измерения проводились во время солнечного затмения) дали следующие результаты: $1,98 \pm 0,18$ и $1,61 \pm 0,45$ угловой секунды.

Интересно отметить, что можно было рассчитать отклонение луча света и «по Ньютону» и результат должен был полу-

читься в два раза меньше, т. е. около 0,87 угловой секунды. Как видите, эксперимент твердо «высказался» в пользу Эйнштейна.

Подводя итог этому разделу, нужно сказать, что если все выводы специальной теории относительности подтверждены экспериментально и она уже стала «технической» наукой (особенно это касается технических расчетов при создании ускорителей элементарных частиц), то общая теория относительности подтверждается пока только незначительным числом экспериментов. Многие явления, о которых мы расскажем ниже, еще не удалось наблюдать. В теоретическом отношении общая теория относительности также продолжает развиваться, хотя основной вклад, сделанный в нее Эйнштейном, не изменился.

Какое время показывают часы в гравитационном поле? Как можно заставить «краснеть» и «голубеть» фотон?

Как вы прочли в предыдущем разделе, основное содержание общей теории относительности состоит в том, что свойства пространства (его метрика) неразрывно связаны с распределением материи в пространстве. Несколько упрощая, можно говорить, что гравитационное поле изменяет метрику пространства.

В понятие метрики пространства входят не только масштабы длины, но и масштабы времени. Согласно Эйнштейну, и они должны изменяться в зависимости от гравитационного поля. Например, должен различаться ритм часов, которые мы поместим в разные точки гравитационного поля. Одни часы расположим на уровне моря, другие — на вершине Эльбруса. Гравитационное поле в этих двух точках, находящихся на разных расстояниях от центра Земли, будет немного различаться, немного должен различаться и ритм часов. Заметим сразу, что здесь мы говорим об идеальных часах, т. е. таких, в которых период колебаний не зависит от силы тяжести (как, например, у маятниковых).

Согласно общей теории относительности, и идеальные часы должны иметь разный ритм. Эффект этот, как и все гравитационные эффекты общей теории относительности, весьма невелик. Часы, расположенные у моря, должны идти медленнее и отставать от часов, расположенных на Эльбрусе, на две сотых доли секунды в год (!). Эффект, конечно, крохотный. Однако он невелик, потому что разница условий в выбранных точках сравнительно слабого гравитационного поля Земли невелика. Но вот для спутника Сириуса этот эффект существенно больше. Плотность этого спутника в 53 000 раз превышает

плотность воды. Это маленькая звезда, имеющая массу, близкую к массе нашего Солнца, но объем ее в 45 000 раз меньше объема Солнца. Если близко к его поверхности расположить часы, то они за год отстанут от земных примерно на 5 мин. Это уже существенно, и если в будущем автоматические межпланетные станции будут посланы к таким звездам, подобный эффект придется учитывать.

Хорошо известно, что каждый атом представляет собой своего рода часы.

Будучи возбужден, атом излучает порции электромагнитного излучения — фотоны строго определенных частот. Для каждого атома характерны свои частоты. По ним физик легко определяет сорт атомов (элемент), их излучающий. Это свойство атомов и использовал астроном Адамс, наблюдавший излучение с поверхности спутника Сириуса (температура его поверхности около 8000°). Частоты фотонов, излучавшихся атомами одного сорта, оказались ниже частот таких же атомов, излучавших фотоны в земных условиях. Это означало, что атомы-часы на поверхности спутника Сириуса идут медленнее (!). Точные измерения хорошо согласовались с предсказанием Эйнштейна.

Однако этот эффект наблюдался в астрономическом опыте, а желание наблюдать на Земле те явления, которые наблюдаются на звездах, у физиков было всегда, и хотя сомнений в астрофизических опытах не было, но все же подтвердить их на Земле казалось как-то надежнее. Основная трудность постановки такого опыта заключалась в том, что стабильности даже самых хороших земных часов не хватало. Самые хорошие атомные часы (так называемые молекулярные генераторы), в которых физики уже научились «хранить время», обладают относительной стабильностью в 10^{-9} — 10^{-10} , т. е. их частота (период) за длительные промежутки времени изменяется на несколько десятиллиардных долей.

Это значит, что за год обычные часы, синхронизированные с помощью атомных, отстанут или уйдут вперед на несколько десятитысячных долей секунды. Стабильность таких часов, которую можно проверять только по таким же часам (ведь более точных на Земле нет), оказывается недостаточной для постановки опыта на Земле по обнаружению влияния поля тяжести на масштаб времени. Немного выше мы указывали, что ритм часов на уровне моря и на вершине должен, согласно Эйнштейну, за год дать разницу в две стотысячные доли секунды.

Выход был найден. В качестве часов использовали уже не излучения атомов, а некоторые очень стабильные линии излучения ядер атомов. Возбужденные ядра атомов могут испускать гамма-кванты. При некоторых определенных условиях относительная стабильность такого излучения необычайно вы-

сока: до 10^{-15} . Честь открытия этого эффекта принадлежит лауреату Нобелевской премии Мессбауэру. И именно эту высокую стабильность в эффекте Мессбауэра использовали американские физики Паунд и Ребка (в 1960 г.). Оказалось достаточным одни такие часы поместить на 20 м выше других, чтобы надежно наблюдать эффекты изменения частоты. Точность совпадения с общей теорией относительности оказалась очень хорошей, а ошибка измерений составляла около 4%.

Интересно, что этому в общем весьма сложному явлению изменения масштаба времени в гравитационном поле можно дать очень простое и наглядное объяснение. Представим себе наблюдателя, стоящего на поверхности Земли и бросающего вверх камень. Внизу, около наблюдателя, камень в момент бросания имеет запас кинетической энергии. На какой-то высоте (ниже самой высокой точки подъема) часть кинетической энергии при движении в гравитационном поле Земли перейдет в потенциальную, и скорость камня уменьшится.

Представим себе теперь, что с той точки, где находится наблюдатель, от очень точных часов послали вверх фотон (квант электромагнитного излучения), чтобы сверить ритм часов с другими часами, находящимися над наблюдателем на высоте H . Фотон, если его частота ν имеет энергию $h\nu$ и массу $m = \frac{h\nu}{c^2}$ (c — скорость света, h — постоянная Планка). Так

же как и при бросании камня, мы должны были бы наблюдать уменьшение кинетической энергии и помнить, что ее убыль переходит в потенциальную энергию, которую можно получить «обратно», отразив с помощью зеркала фотон вниз. Но скорость движения фотона — скорость света, и она измениться не может; следовательно, уменьшение энергии должно произойти за счет уменьшения частоты.

Разница в кинетических энергиях одного и того же фотона в точках, разнесенных по высоте на H , должна быть равна mgH , так же как и при бросании обычного камня (в этой формуле g — ускорение свободного падения, равное вблизи поверхности Земли 980 см/сек^2). Если приравнять эту разницу в энергиях у фотона изменению энергии за счет сдвига частоты: $mgH = h\Delta\nu$ ($\Delta\nu$ — изменение частоты), а затем подставить выражение для массы фотона в это равенство:

$\frac{h\nu}{c^2}gH = h\Delta\nu$, то можно подсчитать относительное изменение частоты $\Delta\nu$ у фотона, пролетевшего в поле тяжести Земли по вертикали путь H :

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{gH}{c^2}.$$

Это и есть формула Эйнштейна для расчета изменения ритма часов в применении к полю Земли. Если подставить в эту

формулу $g=980 \text{ см/сек}^2$, $c=3\cdot 10^{10} \text{ см/сек}$ и $H=10^3 \text{ см}$ (10 м), то получим, что относительное изменение ритма $\frac{\Delta v}{v}=10^{-15}$. Таким образом, фотон, направленный вверх, должен на разнице высот в 10 м изменить частоту на 10^{-15} часть, причем это будет понижение частоты, и фотон должен «покраснеть». Если же, наоборот, «кидать фотон сверху вниз» (имеется в виду, конечно, верх и низ в обычном земном смысле), то на той же разнице высот частота фотона должна повыситься на ту же долю, фотон должен «поголубеть».

Именно этот эффект «поголубения» и «покраснения» гамма-фотонов и наблюдали физики Паунд и Ребка в 1960 г.

Как вы видели, формулу для изменения ритма часов можно получить на основании очень простых соображений, в которых по существу общая теория относительности не используется. Единственно важное, чем мы воспользовались при расчете, что для двух сортов масс фотона применимо то же свойство, что и для обычных тел: отношение массы инертной к массе гравитационной такое же, как и всех тел.

Исходя из этого, многие физики считают, что опыт Паунда и Ребка нельзя считать опытом, подтверждающим исключительную справедливость общей теории относительности по сравнению с другими теориями. По их мнению, этот опыт лучше рассматривать как проверку отношения массы инертной к массе гравитационной у фотона. Но это относится только к области толкования результатов опыта, сам же результат изменения масштаба времени в гравитационном поле ни у кого уже не вызывает сомнения.

Можно ли получить антигравитацию?

До сих пор в нашем повествовании о гравитации речь шла об уже обнаруженных явлениях, которые или легли в основу теории относительности, или подтверждают ее.

Теперь мы расскажем, что можно и что предстоит обнаружить физикам-экспериментаторам и какие проблемы волнуют физиков-теоретиков.

Начнем с вопроса: можно ли получить антигравитацию? Под этим термином обычно имеют в виду не гравитационное притяжение, а гравитационное отталкивание. Как вы уже знаете, опыты говорят о том, что все тела притягиваются друг к другу, и до сего дня физики не обнаруживали исключения в этом жестком правиле. Если бы в природе было обнаружено тело, у которого была бы отрицательная гравитационная масса, т. е. масса, которая не притягивалась бы к остальным, а отталкивалась, то в первую очередь было бы нарушено опытное правило, что отношение инертной массы к гравитационной у всех тел одно и то же. Это означало бы, что основа общей

теории относительности подорвана, теория относительности перестала бы быть общей и т. д.

Однако физикам не привыкать опровергать созданные ими теории или (что значительно чаще) ограничивать области их применения. Поэтому дискуссии об антигравитации, несмотря на их «крамольную» основу, шли. В основном интерес к антигравитации возник в связи с открытием античастиц (антипротонов, позитронов и других), из которых состоят антимир (если они существуют).

Измерить знак массы, а тем более отношение массы инертной к массе гравитационной, у античастиц пока не удалось; это необычайно трудная задача, и экспериментаторы только обсуждают варианты возможных опытов. Однако дискуссии о том, какая же может быть масса у античастиц, уже были. При обсуждении этой проблемы оказалось, что если предположить существование массы с отрицательным знаком, то под сильной угрозой окажется закон сохранения массы-энергии. Этот столп современной физики при «появлении» антигравитации удалось бы спасти, только коренным образом пересмотрев целый ряд представлений о гравитационном поле. Таким образом, с антигравитацией у античастиц дело обстоит не слишком обнадеживающе.

Ну, а нельзя ли, оставаясь «преданным» законам общей теории относительности, все же получить отталкивание двух обычных гравитационных масс? Оказывается, что принципиально все же это возможно. Напомним известное из школьного курса физики явление. Две катушки, в которых протекает электрический ток, будут заметно притягиваться или отталкиваться в зависимости от взаимного направления токов. На этом принципе работает огромная армия электромеханических реле, которые необычайно широко распространены в современной технике.

Как мы уже говорили в начале этой брошюры, гравитационная масса во многом похожа на электрический заряд. Но причина появления магнитного поля в катушке (которое и вызывает притяжение или отталкивание) — движение электрических зарядов. Оказывается, движение гравитационных зарядов (гравитационных масс) тоже вызывает новое поле (новый вид взаимодействия), которое весьма сходно по характеристикам с магнитным. Таким образом, отмеченная нами аналогия между законом Ньютона и законом Кулона распространяется и дальше. Сходны силы не только между неподвижными зарядами, но и между движущимися.

Рассмотрим пример: два массивных диска, если расположить их рядом, будут притягиваться согласно закону Ньютона; если же, не изменяя расстояния между дисками, начать их вращать, то к силе, рассчитанной на основании закона Ньютона, добавится еще одна. Вращающиеся массивные диски будут

вести себя как катушки с током: если параллельно расположенные диски вращать в одну сторону — притяжение усилится, если в разные — ослабнет. Иными словами, добавочная «гравимагнитная» сила может ослабить притяжение.

Ну, а нельзя ли так раскрутить диски, чтобы сила притяжения оказалась меньше, чем сила отталкивания? Принципиально можно. Никаких запретов в этом отношении теория относительности не дает. Но, однако, эффект возможного отталкивания необычно слаб. В лабораторных условиях экспериментаторы и не делали еще попыток его наблюдать. Если представить себе, что мы раскручиваем диски из самой прочной стали со скоростью на грани их развала из-за центробежных сил, то сила обычного ньютоновского притяжения ослабнет (или увеличится в зависимости от направления вращения) всего на одну миллиардную долю.

Таким образом, вся трудность только в том, что современные материалы не выдерживают больших внутренних напряжений, и, следовательно, тела, созданные из них, могут вращаться только с ограниченными скоростями. Ну, а если такие материалы удастся создать, тогда можно будет представить себе космический корабль, который преодолевает гравитационное поле нашей планеты не за счет реакции отброшенных газов, а отталкиваясь от поля тяготения Земли быстровращающимся массивным диском. Удастся ли создать такие материалы — это вопрос будущего, а может быть, и просто фантастика.

Мы рассказали об одном эффекте, который еще предстоит обнаружить физикам-экспериментаторам. Не к чести современных экспериментаторов нужно сказать, что, кроме этого эффекта, общая теория относительности предсказала еще несколько явлений, которые уже давно можно рассчитать, но довольно сложно наблюдать на опыте. Правда, в оправдание экспериментаторов скажем, что в обычных лабораторных масштабах эти эффекты весьма невелики и опыты ставить очень трудно. Поэтому пока в научной литературе в основном обсуждают трудности при постановке соответствующих опытов и возможные пути их преодоления.

Проблема обнаружения гравитационных волн

До сих пор мы рассказывали о физических явлениях, связанных с гравитационным взаимодействием в ближней зоне, т. е. тогда, когда тела расположены относительно близко. В ближней зоне эффекты общей теории относительности достаточно велики. Достаточно для того, чтобы два из них удалось обнаружить в астрономических опытах. Но теория отно-

сительности предсказывает и другие эффекты, которые могут быть обнаружены в дальней зоне гравитационного взаимодействия. О том, что это за эффекты и что такое дальняя зона, мы и расскажем.

Мы уже неоднократно говорили, что гравитационные массы по законам взаимодействия напоминают электрические заряды. Закон всемирного тяготения Ньютона весьма сходен с законом Кулона для электрических зарядов, закон взаимодействия движущихся гравитационных масс идентичен закону Био и Саварра, описывающему взаимодействие электрических токов. Эта аналогия распространяется и дальше. Уравнения Эйнштейна для гравитационного поля (т. е. уравнения, описывающие процессы в части пространства, где действуют гравитационные силы) сходны с уравнениями Максвелла для электромагнитного поля (т. е. уравнениями, описывающими процессы, происходящие в части пространства, где действуют электрические и магнитные силы). Правда, нужно заметить, что уравнения Эйнштейна существенно сложнее уравнений Максвелла, однако несомненное сходство в структуре уравнений есть.

Английский физик Максвелл, объединивший все известные до него опытные сведения об электрических и магнитных явлениях и создавший на этой основе теорию электромагнитного поля, подметил, что одно из возможных решений его уравнений представляет собой волновой электромагнитный процесс. Он должен возникать каждый раз, когда электрический заряд движется неравномерно — с ускорением или замедлением. Скорость распространения этого волнового процесса (электромагнитной волны) в вакууме, согласно расчетам Максвелла, должна была равняться скорости света.

Это привело физиков к мысли, которая подтвердилась на опытах, что свет — тоже электромагнитные волны. Особенность электромагнитной волны — этого электромагнитного поля, распространяющегося с огромной скоростью (300 000 км/сек), состоит в том, что волна (поле) оторвалась, «отпочковалась» от породившего ее ускоренно движущегося электрического заряда. После своего «рождения» электромагнитная волна движется, отражается, взаимодействует с веществом уже независимо от поведения породившего ее заряда.

Электромагнитные волны наблюдал впервые в лабораторных условиях Генрих Герц. А после работ нашего замечательного соотечественника Александра Степановича Попова радиосвязь так тесно вошла в современную технику и быт, что трудно себе представить сегодняшний мир без радио и телевидения.

После этой небольшой экскурсии в смежную с гравитационными явлениями область вернемся к вопросу о сходстве

между уравнениями Максвелла и Эйнштейна. Оказалось, что и для уравнений Эйнштейна, которые описывают гравитационное поле, есть решение, представляющее собой волновой процесс — гравитационную волну. Так же как и для электромагнитных волн, достаточно двигать ускоренно любую гравитационную массу и в принципе можно наблюдать возникновение и распространение гравитационной волны. Скорость распространения такой волны оказалась, согласно расчету, также равной $300\,000\text{ км/сек}$, т. е. скорости распространения электромагнитной волны.

Однако это решение было получено только на бумаге, а физикам необходим для «полного спокойствия» еще и эксперимент. Тем более, что и сам расчет, как оказалось, имеет свои слабые места.

Один из сотрудников Эйнштейна, ныне действительный член Польской академии наук Леопольд Инфельд, показал (конечно, расчетным путем), что возможен случай, когда гравитационные массы движутся ускоренно, а гравитационного излучения нет. Это позволило ему заранее (до опыта) усомниться в существовании гравитационных волн, которые могут переносить энергию.

Надо сказать, что все же большинство физиков, занимающихся теорией относительности, считают, что гравитационные волны существуют и переносят энергию. Однако ни в одной из наук, и в физике, конечно, тоже, такие вопросы не решаются большинством голосов.

Таким образом, вопрос о волнах стал еще острее. Но поставить прямой опыт оказалось значительно труднее, чем найти решение, соответствующее гравитационной волне в уравнениях Эйнштейна. Опыт перерос в большую экспериментальную проблему, к которой физики самых разнообразных специальностей обращались и обращаются по сей день. В научной физической печати за последнее время появилось около десяти различных статей, затрагивающих проблему постановки опытов по обнаружению гравитационных волн. Пока это только проекты или самые предварительные эксперименты. Почему эти опыты оказались такими трудными?

Обратимся к простому физическому явлению. Представим себе наблюдателя, который стоит на легкой тележке и бросает горизонтально тяжелый камень. Камень полетит в одну сторону, наблюдатель с тележкой поедет в другую. А общий центр тяжести (точнее, центр масс) останется на месте. Этот факт — следствие законов механики Ньютона, и он прекрасно подтвержден на опыте. То же самое происходит при взлете ракеты, покидающей Землю: общий центр масс ракеты, отработанных газов и Земли (!) остается на месте. Ракета летит в одну сторону, а выброшенное реактивное горючее и Земля — в другую. Правда, масса Земли значительно больше массы ра-

кеты, и поэтому мы этот эффект изменения траектории Земли не замечаем, однако принципиально он существует.

Таким образом, всякое переменное движение инертной массы в одном направлении должно сопровождаться переменным же движением другой массы в противоположном направлении, причем таким, что общий центр масс остается на месте.

Вспомните теперь об опытах Этвеша и Дике, о которых говорилось в начале нашей книжки. Ведь, согласно этим опытам, для всех тел отношение массы инертной к гравитационной есть одно и то же число. А это значит, что любое переменное движение одной гравитационной массы должно быть связано с переменным (но противоположным по направлению) движением другой гравитационной массы.

Таким образом, гравитационное излучение, возникающее при переменном движении одной из масс, будет в значительной мере уничтожаться гравитационным же излучением другой массы.

Вся неприятность для физиков-экспериментаторов и состоит в том, что все гравитационные массы имеют один и тот же знак и все пропорциональны инертным массам. В электродинамике этого нет, там можно добиться, чтобы положительные заряды стояли на месте, а отрицательные (электроны) двигались. Так происходит в металлических антеннах, с помощью которых излучаются и принимаются электромагнитные волны.

Таким образом, даже самая «хорошая» гравитационная антенна (т. е. несколько ускоренно движущихся масс) будет очень слабо излучать гравитационные волны. Приведем числовой пример. Если взять несколько брусков кварца массой в 1 т, возбудить в них такие упругие колебания, что бруски будут колебаться в режиме, близком к разрушению (на это понадобится около 10^{+8} вт мощности), то мощность всего гравитационного излучения брусков составит 10^{-21} вт. Таким образом, в тепло уйдет 10^{+8} вт— 10^{-21} вт, а в излучение 10^{-21} вт. Коэффициент полезного действия оказывается равным всего лишь 10^{-29} . Конечно, это мизерная цифра, но нужно отметить, что пример, который мы привели, — один из наиболее удачных в отношении коэффициента полезного действия.

Величина мощности 10^{-21} вт не могла бы испугать физиков-экспериментаторов, если бы это была мощность электромагнитного излучения. Применение хороших усилителей позволило бы без особого труда зарегистрировать такую мощность. Однако это гравитационное излучение, и принять его так же трудно, как и излучить. Иными словами, коэффициент полезного действия гравитационной принимающей антенны такой же маленький, как у излучающей. Иначе от мощности в 10^{-21} вт попало бы на выход чувствительных усилите-

лей только 10^{-29} часть, т. е. для усиления экспериментатору досталась лишь 10^{-50} доля ватта.

Такую величину мощности никто еще никогда не измерял.

Дело не в том, что нельзя сделать радиоусилитель с достаточным коэффициентом усиления, а в том, что на нашей Земле (и в нашей Галактике) слишком тепло. Слишком — для измерения таких мощностей. Теплота — хаотическое движение молекул, атомов, электронов — один из злейших врагов физиков-экспериментаторов. Хаотическое движение электронов в радиолампах, проводниках приводит к тому, что, начиная с определенного уровня, физик вместе с полезным сигналом невольно усиливает и электрические шумы, вызванные этим хаотическим движением в самом усилителе. Они так и называются шумами, в частности, потому, что в составе их частот есть и звуковые. В микрофон, присоединенный к чувствительному усилителю, такой шум можно услышать. Если мощность сигнала еще меньше, то он буквально тонет в шуме.

С этого момента и начиналась драматическая борьба за превышение сигнала над шумом. В этой борьбе экспериментаторы нашли союзников. Снизили температуру, были созданы квантовые малошумящие усилители (мазеры), и шаг за шагом шум постепенно отступает. Однако это отступление все же связано со значительной потерей — потерей времени. Чтобы выделить очень маленький сигнал из шума, нужно затратить очень много времени. Чем меньше сигнал, тем больше времени. Например, при комнатной температуре сигнал мощностью в 10^{-25} вт можно обнаружить, потратив примерно сутки. При температуре жидкого гелия ($+4^{\circ}$ выше абсолютного нуля) потребуется на это же около 15 мин.

Но для обнаружения мощности 10^{-50} вт, к сожалению, даже при температуре жидкого гелия пришлось бы затратить 10^{+28} сек. Напомним, что нашей цивилизации 40—50 тыс. лет, т. е. $1,2 \cdot 10^{+12} \div 1,5 \cdot 10^{+12}$ сек, что существенно меньше.

Таким образом, перспективы создания передатчика и приемника гравитационных волн в земных условиях не слишком блестящие. Однако мы говорили о шумах электромагнитных, а не гравитационных, а последние существенно слабее (вот тут слабость гравитационного взаимодействия «работает» на пользу экспериментаторов). Таким образом, слабые надежды на создание пары «передатчик—приемник» все же есть. Но пока экспериментаторы обратили внимание на внеземные источники гравитационного излучения. Предварительные опыты, которые они уже начали ставить, рассчитаны на обнаружение гравитационного излучения, падающего на Землю извне.

Что может быть источником гравитационного излучения? Как мы уже говорили, любое неравномерное движение масс.

Экспериментаторы в основном надеются на интенсивные

взрывы на Солнце (которые эквивалентны взрывам сотен мощных водородных бомб) и на излучение быстровращающихся вокруг общего центра двойных звезд. Эти источники гравитационного излучения, возможно, и удастся обнаружить на Земле.

Один из первых опытов по обнаружению межзвездного гравитационного излучения выглядел так: Землю можно рассматривать как приемную гравитационную антенну. Поэтому по слабым колебаниям Земли (как упругого тела), если считать, что они вызваны гравитационным излучением, можно оценить его мощность. Во время чилийского землетрясения в США были измерены самые низкочастотные колебания Земли (самое длинное имеет период около 54 мин.). Затем по спокойному уровню колебаний Земли, в периоды между интенсивными землетрясениями, был оценен уровень гравитационного излучения, который мог вызвать такие колебания. Однако получившееся число (40 вт/см^2 !) оказалось чудовищно большим. Никаким внешним источником гравитационного излучения нельзя было объяснить поток такой мощности. Иными словами, колебания Земли в спокойный период все же, по-видимому, вызваны внутренними процессами, происходящими внутри нее.

Таким образом, проблему обнаружения гравитационных волн еще предстоит решить. Кроме принципиальной важности решения этого вопроса, есть надежда, что гравитационные волны, приходящие из космоса, могут стать новым источником астрофизической информации.

Можно ли и нужно ли подправлять Эйнштейна? Что такое единая теория поля?

Со времени создания общей теории относительности прошло почти 50 лет. Ученики и последователи теории Эйнштейна за это время разрабатывали и развивали основные положения, выдвинутые самим создателем теории. Значительный вклад в общую теорию относительности внес лауреат Ленинской премии академик В. А. Фок. Интересные исследования, посвященные общей теории относительности, были выполнены советскими физиками Е. М. Лифшицем, И. М. Халатниковым, В. В. Судаковым, Д. Д. Иваненко, А. М. Бродским. Однако эти работы лишь дополняли деталями стройную башню теории, воздвигнутую самим Альбертом Эйнштейном. Дополняли, но не противоречили, не изменяли существенно.

Но вот относительно недавно советский физик профессор А. З. Петров сумел выделить три возможных вида решений уравнений Эйнштейна. Двум из этих видов решений соответ-

вуют уже известные физические процессы (имеются в виду такие движения гравитационных масс, которые приводят к изменениям свойств пространства, соответствующим этим решениям). Третьему виду решений пока соответствия не найдено. А если достоверно не будет найдено, то это значит, что уравнения Эйнштейна «дают» лишний результат, которого нет в природе. и тогда общую теорию относительности придется существенно подправлять. Это, пожалуй, единственное место в теории, которое вызывает у физиков-теоретиков сомнения и надежды, надежды на следующий этап развития.

Как мы уже говорили, общая теория относительности объясняет общие законы взаимодействия гравитационных масс и влияние гравитационных масс на свойства пространства и времени. Она связывает и электромагнитные явления с гравитационными (вспомните отклонение луча света в поле тяготения Солнца). Однако она, несмотря на свое название, не является всеобщей, т. е. объединяющей все виды взаимодействий. Мечта создать такую общую, или, как говорят, единую, теорию поля стала мечтой многих физиков-теоретиков. В этой теории должны быть органически объединены ядерные электромагнитные и гравитационные поля в едином стройном порядке. Быть может, удастся при создании такой теории «объяснить» причину взаимного притяжения масс, притяжения и отталкивания ядерных зарядов. Под словом «объяснить» имеется в виду свести к более простому и более общему виду явлений. Весьма желательным было бы получить в этой теории связь между такими мировыми постоянными, как гравитационная постоянная, скорость света, заряд и масса электрона, постоянная Планка и т. д.

Желание объединить все существующие физические теории, которые пока только «сосуществуют», естественно. Однако прошло вот уже около 30 лет, как эта задача была поставлена, и до сих пор она не решена. Почему — сказать трудно. Может быть, дело в том, что недостает связующих новых экспериментальных фактов, а может быть, и в том, что еще не родились принципиально новые идеи, которые могли бы лечь в основу единой теории поля. Ответ на этот вопрос должно дать будущее развитие физики.

Необычные превращения

В этом разделе мы расскажем о гравитационных явлениях еще более труднонаблюдаемых и, пожалуй, более интересных, чем гравитационные волны.

Прежде чем перейти к этим явлениям, напомним о двух физических фактах.

Первый из них обычно называют аннигиляцией элементарных частиц. В явлениях микромира весьма часто, и в том числе в лабораторных условиях, наблюдают столкновение и «полное» уничтожение (аннигиляцию) двух элементарных частиц — антиподов, например, электрона и позитрона, протона и антипротона. При столкновении двух таких частиц в месте столкновения рождаются два мощных гамма-кванта.

Напомним, что гамма-квант, или, иначе, гамма-фотон, — элементарная порция (квант) электромагнитного излучения. При аннигиляции, как и во всех известных физических процессах, полностью выполняется закон сохранения массы — энергии.

Второй факт состоит в том, что в явлениях микромира энергия передается только в виде определенных порций — квантов. Квант электромагнитного излучения носит специальное название — фотон, квант упругих волн называют фононом. Будучи последовательной, довольно значительная группа физиков-теоретиков решила, что при гравитационном взаимодействии в явлениях микромира также должен проявиться квантовый характер. И первым, самым естественным выводом на этом пути рассуждений было предположение, что гравитационная волна также должна состоять из порций энергии (как электромагнитная волна из фотонов).

Такие кванты гравитационного излучения получили специальное название — гравитоны. После этого было подсчитано, какова вероятность того, что при столкновениях элементарных частиц (например, античастиц) вместо «обычных» превращений произойдут «необычные», — ну, например, вместо двух гамма-фотонов родится пара гравитонов.

Вероятность этого события оказалась весьма незначительной. Одного такого события нужно, по первым оценкам, ждать многие миллионы лет, наблюдая огромное число (астрономическую цифру) «обычных» аннигиляций. Однако наблюдать такой эффект кажется весьма заманчивым. По выражению одного физика, можно было бы наблюдать превращение обычной материи в кривизну. Ведь, по Эйнштейну, кривизна пространства порождается гравитационной массой. Интересно отметить, что такая малая вероятность «необычных» превращений с «гравитационным выходом» в микромире соответствует в макромире «слабости» гравитационного взаимодействия.

Но теперь мы должны сказать, что в нашем рассказе о гравитации мы дошли до самого переднего края науки: далеко не все физики считают возможным квантовать (делить на кванты) гравитационное поле, некоторые даже утверждают, что такие явления, как только что описанное превращение элементарных частиц в гравитоны, принципиально невозможны.

В популярном рассказе о тяготении нельзя привести дока-

зательства «за» и «против» в этом споре; однако интересно отметить, что основной довод противников «необычных» превращений состоит в том, что гравитационное поле занимает необычное место среди других (ядерного, электромагнитного и т. д.), что гравитационное поле существует всегда одновременно с другими полями, что оно обладает универсальным характером и поэтому к нему не применимы «обычные» квантовые методы. Кто из двух спорящих сторон прав, покажет будущее, и вопрос, возможно, будет решен в эксперименте, хотя реальный эксперимент еще и не придуман. Этот раздел о самых необычных свойствах гравитационных явлений, по-видимому, разумнее всего окончить ответом самого Эйнштейна на вопрос о том, как делаются великие открытия. Он ответил: все обычно считают, что это невозможно. Кто-то этого не знает, он-то и совершает открытие.

Гравитация и строение Вселенной

Гравитационное притяжение играет в жизни нашей Вселенной одну из самых важных ролей (если не самую важную).

Движение планет вокруг Солнца, искусственных спутников вокруг Земли и Солнца происходит строго по законам общей теории относительности (вспомните два процента точности в учете вращения перигелия Меркурия, составляющего 43 угловых секунды в столетие).

Огромные массы нейтральных (не заряженных) скоплений звездного вещества притягиваются друг к другу в соответствии с теорией Эйнштейна, а в первом приближении — в соответствии с законом Ньютона. Таким образом, общая теория относительности должна в основных чертах описывать движение больших масс в космосе. Мы подчеркнули, что это относится только к большим массам. Для малых масс (например, пылинок в хвостах планет и пылевых облаках, заряженных пылинок, элементарных частиц, ионов) более существенную роль играют другие, более сильные, чем гравитационное, виды взаимодействия, как, например, давление света, электрические и магнитные поля. Вспомним, что если голова кометы движется вокруг Солнца строго по законам Кеплера, то хвост кометы, состоящий из легких частиц, отклоняется световым давлением в сторону «от Солнца» и тем самым «нарушает» законы Кеплера.

Теперь поставим вопрос, на который по существу еще астрономы не дали ответа: всегда ли, на всех расстояниях, включая и межгалактические, выполняются законы тяготения в известном для нас виде? Пытаясь получить ответ на такой вопрос, астрономы изучали движение различных частей галактик

и самих галактик относительно друг друга. И при этом они «наткнулись» на поразительный факт, который все более точно подтверждался в последующих исследованиях. Факт состоял в следующем: чем дальше находится от нас галактика, тем быстрее она от нас удаляется. Самые далекие из обнаруженных галактик «разбегаются» со скоростями, составляющими почти половину скорости света! Скорость растет на каждый миллион лет светового расстояния примерно на 25 км/сек .

Измерить эту скорость удалось с помощью так называемого эффекта Доплера. Он заключается в том, что частота электромагнитного излучения, воспринимаемая наблюдателем, зависит от скорости движения источника. Если источник удаляется от наблюдателя, то частота ниже, если приближается, то выше по сравнению с частотой, излучаемой неподвижным источником.

Изучая излучение далеких галактик, астрономы обнаружили понижение частоты оптического излучения возбужденных атомов. Это понижение частоты (его обычно называют красным смещением) тем больше, чем дальше от нас галактика. Этот удивительный факт оказался в согласии с теорией Эйнштейна. Наш соотечественник А. А. Фридман в 1922 г. показал, что если считать распределение вещества во Вселенной примерно однородным, то возможно такое решение гравитационных уравнений Эйнштейна, которое соответствует «разбеганию» галактик. Однако полной количественной проверки теории Эйнштейна в этом случае еще не получила. Для этого нужно, по крайней мере, знать среднее значение плотности вещества в близком нам районе Вселенной, которое пока известно недостаточно точно.

Таким образом, в этом случае теория Эйнштейна дает только качественное объяснение наблюдаемых фактов, какого другие теории пока дать не смогли.

На этом мы закончим рассказ о загадке тяготения. Конечно, мы коснулись только основных вопросов, связанных с опытными явлениями и их теоретическим объяснением, настолько, насколько это возможно в рамках популярной брошюры. Нет сомнения в том, что наука о тяготении в ближайшие годы обогатится новыми интересными фактами и теоретическими исследованиями, которые будут иметь большое значение при освоении человеком космоса.

Интересно, полезно знать

Знаете ли вы, что...

...сила, с которой Солнце притягивает Землю и тем самым заставляет ее двигаться по круговой траектории, составляет $3,6 \cdot 10^{18}$ т, а световое давление, испытываемое Землей от потока солнечного излучения примерно $6 \cdot 10^4$ т.

...если рассчитывать траекторию межпланетного полета не по точной теории Эйнштейна, а пользуясь только приближенным законом Ньютона, то при средней скорости корабля в 10 км/сек ошибка в расчете составит примерно 10^{-2} часть (одну миллиардную), а при скорости 3000 км/сек ошибка составит 10^{-4} (одну десятитысячную). Для второго примера при полете корабля на 100 млн. км (среднее расстояние от Земли до Марса) неточность составит 10 тыс. км.

Когда скорости межпланетных и межзвездных кораблей достигнут десятых долей скорости света, то расчеты траекторий «по Ньютону» станут невозможными, так как ошибки составят десятки процентов.

...если на орбите Земли, движущейся вокруг Солнца, поместить перпендикулярно солнечным лучам тонкий, хорошо отражающий лучи лист, каждый квадратный метр которого имел бы массу не более 2 г, то световое давление солнечного излучения будет отталкивать его с силой, большей, чем его гравитационное притяжение к Солнцу. Идея такого светового паруса содержится в некоторых проектах межпланетных кораблей.

...в опытах Дике по проверке постоянства отношения массы инертной к массе гравитационной можно было заметить силу в $3 \cdot 10^{-9}$ дины, действующую на крутильный маятник. Такой силе соответствует вес одной миллионной части человеческого волоса длиной в 1 см.

...одна из установок по обнаружению гравитационного излучения, падающего из космоса на Землю, представляет собой алюминиевый цилиндр длиной около 3 м и массой $1,5$ т. Цилиндр подвешен за середину и помещен в вакуум в 10^{-6} мм ртутного столба. В середине цилиндра прикреплены кристаллы кварца. Идея опыта состоит в следующем: гравитационная волна возбудит колебания в цилиндре; периодические механические натяже-

ния, которые возникнут в цилиндре при колебаниях, будут преобразованы кристаллами кварца, обладающими пьезоэлектрическими свойствами, в электрические сигналы. Эти электрические сигналы после усиления можно будет зарегистрировать. Авторы этой установки уже умеют наблюдать колебания цилиндра с размахом в 10^{-16} см (одна десятиллиардная доля от одной миллионной доли сантиметра). При достигнутой чувствительности можно было бы наблюдать мощность гравитационного излучения около 10^{-10} вт на квадратный сантиметр (Мерилендский университет, США).

...взрывы на Солнце, соответствующие по энергии нескольким сотням водородных бомб, сопровождаются гравитационным излучением; при этом на Землю падает примерно 10^{-24} вт на квадратный сантиметр.

...при взрыве сверхновой звезды полная энергия гравитационного излучения составляет величину порядка 10^{+27} кгм.

...согласно одной из обсуждаемых сейчас гипотез, гравитационная постоянная изменяется во времени и уменьшается вдвое примерно за 10^9 лет. Влияние этого дрейфа можно было бы обнаружить по изменению периода вращения искусственного спутника Земли. За год период вращения должен изменяться на одну 10^{-10} часть.

...электромагнитные волны, пересекающие постоянное магнитное поле, могут преобразовываться в гравитационное излучение. Коэффициент такого преобразования невелик — около 10^{-30} . Однако его можно увеличить, увеличивая напряженность магнитного поля и путь, проходимый волнами в магнитном поле.

Краткий словарь к тексту брошюры

Гравитационное поле — область пространства, в котором действуют гравитационные силы.

Гравитационная постоянная — величина силы, с которой притягиваются две единичные точечные массы, разнесенные на расстояние, равное единице. Выбор единиц массы и расстояния определяется выбором системы единиц.

Дина — единица силы. Если на тело с инертной массой 1 г подействовать силой, равной 1 дине, то оно начинает двигаться с ускорением 1 см/сек². Дина равна $1/980$ г силы. Грамм силы — это вес грамма массы на уровне моря и на широте 45° .

Интерферометр — оптический прибор, в котором используется явление интерференции света. Интерферометры используются в практике физического эксперимента для определения оптических свойств твердых тел, газов, жидкостей, для измерения малых механических перемещений.

Квант — минимальная порция (доля) энергии, которая может быть передана от одного тела к другому.

Молекулярные генераторы — генераторы электромагнитного излучения, использующие излучения возбужденных молекул некоторых газов; обладают весьма большой стабильностью частоты (относительные уходы частоты в наилучших образцах не превышают 10^{-10} части за длительное время). Молекулярные генераторы работают в сантиметровом диапазоне длин волн.

Ускорение — изменение скорости в единицу времени.

Фотон — квант электромагнитного излучения

Эфир (в физике) — термин, под которым в конце XIX и начале XX в. подразумевали среду, в которой распространяются электромагнитные волны.

Советуем прочитать

Я. А. Смординский. Геометрия Вселенной. Изд-во «Знание», 1962.

А. З. Петров. Пространство — время и материя (элементарный очерк современной теории относительности). Изд-во Казанского ун-та, 1962.

Альберт Эйнштейн. Сущность теории относительности. М., ИЛ, 1955.

М. А. Тоннела. Основы электромагнетизма и теории относительности. М., ИЛ, 1962.

Для чтения первых двух книг из приведенного списка от читателя требуется знание математики только в объеме средней школы, и их надо читать в первую очередь. Книга самого Эйнштейна и учебник М. А. Тоннела требуют более серьезной математической подготовки.

О ЧЕМ РАССКАЗЫВАЕТСЯ В ЭТОЙ КНИЖКЕ

| | <i>Стр.</i> |
|---|-------------|
| Что считать в науке загадкой? | 3 |
| Закон всемирного тяготения. Масса инертная и гравитационная | 5 |
| Гравитационная постоянная. Опыты Этвеша и Дике | 6 |
| Можно ли экранироваться от тяготения? | 9 |
| Законы движения планет. Поведение перигелия Меркурия | 11 |
| Основные принципы теории относительности. От- клонение луча света Солнцем | 12 |
| Какое время показывают часы в гравитационном поле? Как можно заставить «краснеть» и «голу- беть» фотон? | 20 |
| Можно ли получить антигравитацию? | 23 |
| Проблема обнаружения гравитационных волн. . . | 25 |
| Можно ли и нужно ли подправлять Эйнштейна? Что такое единая теория поля? | 30 |
| Необычные превращения | 31 |
| Гравитация и строение Вселенной | 33 |
| П р и л о ж е н и е: «Интересно, полезно знать»: | |
| Знаете ли вы, что... | 35 |
| Краткий словарь к тексту брошюры | 36 |
| Советуем прочитать | 37 |

Автор
ВЛАДИМИР БОРИСОВ

Редактор *И. Б. Шустова*

Техн. редактор *Л. Е. Атрощенко*

Корректор *А. А. Пузакова*

Сдано в набор 25.7 1963 г. Подписано к печати 3.10 1963 г. Изд. № 218.
Формат бум. 60×90¹/₁₆. Бум. л. 1,25. Печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,19.
А 04410. Цена 8 коп. Тираж 19500 экз. Заказ № 2116.
Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

8 коп.

**Индекс
70059**