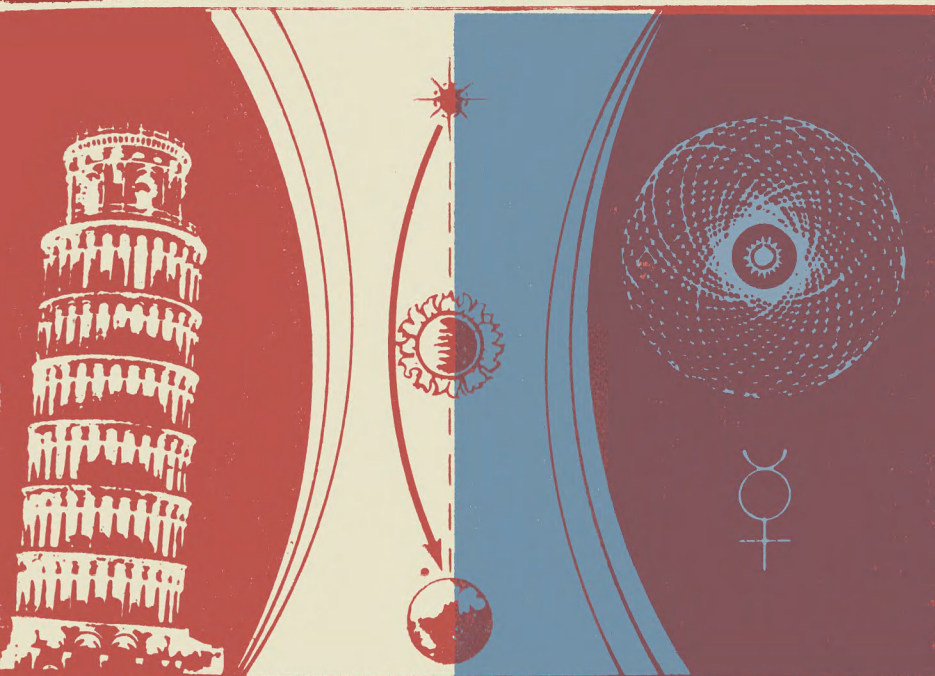


НОВОЕ  
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ



11/1975

СЕРИЯ  
ФИЗИКА

Я.А.Смординский  
ТЯГОТЕНИЕ

Я. А. Смородинский,  
доктор физико-математических наук

# ТЯГОТЕНИЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»  
Москва 1975

**Смородинский Я. А.**

**С51 Тяготение. М., «Знание», 1975.**

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Физика», 11. Издается ежемесячно с 1947 г.).

В книге рассказано об истории и современном состоянии теории тяготения. Основное внимание сосредоточено на изложении идей общей теории относительности и их приложениях к вопросам эволюции Вселенной. Разобрано несколько парадоксов общей теории относительности и рассказано о ее роли в космологии.

Изложение материала рассчитано на широкие круги читателей.

20402

530.1

**СМОРОДИНСКИЙ Яков Абрамович**

**ТЯГОТЕНИЕ**

Редактор К. А. Кутузова

Худож. редактор М. А. Гусева

Техн. редактор Т. В. Самсонова

Корректор О. Ю. Мигун

А 10848 Индекс заказа 54011. Сдано в набор 6/VIII 1975 г. Подписано к печати 17/IX 1975 г. Формат бумаги 84×108<sup>32</sup>. Бумага типографская № 1. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0 Усл. л. 3,36. Уч.-изд л 3,39. Тираж 53 300 экз. Издательство «Знание». 101835. Москва, Центр, проезд Сьрова, д. 4. Заказ 1551. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д 3/4. Цена 11 коп.

© Издательство «Знание», 1975 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

«Истина, как известно, вносит в мир простоту, а не хаос, Истина — это язык, выявляющий общую закономерность. Ньютон вовсе не «открыл» — как решают ребус — закон, долго оставшийся неизвестным, Ньютон совершил творческий акт. Он создал такой язык, с помощью которого человек может рассказать и о падении яблока на лужайку, и о восходе солнца. Истина — это вовсе не то, что можно убедительно доказать. Это то, что делает все проще и понятнее.

Э к з ю п е р и, «Земля людей»

В природе нет явления, более привычного, чем падение камня. Орел, бросая черепаху, практически использует силу притяжения к Земле. Но в этом простом явлении заключена одна из самых глубоких тайн природы. Если о падении камня рассказывали детям в школе, то о теории тяготения, об общей теории относительности избегали говорить серьезно даже студентам. Совсем недавно эта наука была самой абстрактной и далекой от приложений. Зато в последние два-три десятилетия теория тяготения необычайно расширила область своего применения и наполнилась богатым физическим содержанием. Язык общей теории относительности был самым трудным языком науки; сейчас на нем говорят многие. В этой книжке мы расскажем о том, как развивалась эта наука и как в ней соединились идеи, между которыми на первый взгляд не было ничего общего.

## ЛЕГЕНДЫ И ГИПОТЕЗЫ

Люди любят легенды. Каждый знает историю о том, как Ньютон отдыхал в своем саду и как яблоко упало ему на голову. Так рассказывают об открытии закона всемирного тяготения. Все правдоподобно в этой истории. Надо объяснить только одно: что же открыл Ньютон. То, что яблоко падает на землю, знали все. Аристотель учил, что движения бывают трех сортов: тяжелые тела падают вниз, легкие (дым) стремятся вверх, а небесные (идеальные) катятся по сферам, описывая окружности. Даже предположение о том, что Земля притягивает яблоко, не было новым. В 1538 г. Фраскатор писал, что все тела взаимно притягиваются. Гильберт и Бэкон считали Землю магнитом. Кеплер, младший современник Галилея, говорил о действии Солнца на Землю и правильно объяснял причину приливов.

Наверное, были и другие ученые, которые понимали, что между телами действуют силы притяжения. Эта идея, как принято говорить, носилась в воздухе, и к тому времени, как Ньютон представил Королевскому обществу в Лондоне свою огромную рукопись «Математические начала натуральной философии» (28 апреля 1686 г.), приоритет его оспаривали несколько англичан (Гук, Врен, Галлей). Все они знали, что сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния и что движения планет объясняются этим законом. Ньютон очень задержался с опубликованием открытого им закона, о котором он знал уже в 1666 г., когда делал первую попытку построить теорию движения Луны. Эта попытка была неудачной из-за того, что Ньютон использовал в расчетах известное в то время неверное значение радиуса Земли. Но, конечно, не один только приоритет определяет величие открытия Ньютона. В работах Ньютона закон всемирного тяготения предстал как наиболее общий закон Вселенной, и на его основе была построена строгая математическая теория, далеко превзошедшая по своей завершенности отрывочные и часто неточные заключения его современников. Великими «Началами» Ньютона открылась новая наука — небесная механика. Движение Луны, планет, а затем звезд, галактик и, наконец, самой Вселенной стало понятно человеку.

Впервые было обнаружено, что законы космоса не отличаются от законов земных. В отличие от своих современников Ньютон смотрел на проблему как математик. Он не мог удовлетвориться общими рассуждениями о тяготении, ему необходимо было, как теперь говорят, хорошее согласие теории с опытом. Ньютон написал уравнения механики; до него вообще нельзя было решить какую-нибудь задачу точно. Галилей объяснял законы падения тел с помощью прогрессий, Гук вообще не знал, как проверить закон обратных квадратов. В те времена никто даже толком не понимал, что такое сила. Все изменилось после того как Ньютон написал свои уравнения. Сила теперь оказалась связанной с ускорением, а с помощью созданного Ньютоном же математического анализа можно было решать написанные уравнения. Современники Ньютона ни решать, ни даже писать уравнения не умели. Ньютона надо считать родоначальником теоретической физики: он первый из естествоиспытателей перешел от качественного описания явлений к их строгой математической теории. С этих пор теория могла быть признана только в том случае, если она давала объяснение числам, полученным из опыта. Когда мы в наше время восторгаемся точностью квантовой электродинамики, объясняющей самые тонкие детали атомных спектров, мы знаем, что в этом отражается тот дух теоретической физики, который был создан гением Ньютона.

Задача Ньютона была не из легких. Ему понадобилось несколько лет, чтобы понять, как применить закон всемирного тяготения к Земле и Луне, которые никак нельзя считать материальными точками. Только доказав теорему — первую теорему в теории тяготения, — что тело со сферически симметричным распределением масс притягивает другие тела, как материальная точка той же массы, Ньютон счел возможным применить свой закон к движению Луны.

Так на самом деле в легенде о яблоке отразилось свидетельство о многолетнем титаническом труде, превратившем гипотезу в физическую теорию. После Ньютона осталась нерешенной вторая часть проблемы. Формулы и уравнения не могли прояснить природу тяготения. Сам Ньютон по этому поводу сказал: «Причину этих свойств тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю. Все же, что не вы-

водится из явлений, должно называться гипотезою. Но гипотезам метафизическим, физическим, механическим, скрытым свойствам не место в экспериментальной философии». Такая программа определила развитие физики на следующие двести лет. Считалось, что объяснение явления должно состоять в том, чтобы сопоставить ему не очень сложную механическую модель. Так, для того чтобы объяснить тяготение, надо было придумать какую-то среду, по которой тяготение распространяется, — эфир.

Чтобы понять, как думал об этом Ньютон, прочтите его слова, которыми он завершает «Свои математические начала натуральной философии»:

«Теперь следовало бы добавить о некотором тончайшем эфире, проникающем все сплошные тела и в них содержащемся, коего силою и действиями частицы тел при весьма малых расстояниях взаимно притягиваются, а при соприкосновении сцепляются, наэлектризованные тела действуют на большие расстояния, как отталкивая, так и притягивая близкие малые тела, свет испускается, отражается, преломляется, уклоняется и нагревает тела, возбуждает всякое чувство, заставляющее члены животных двигаться по желанию, передаваясь именно колебаниями этого эфира от внешних органов чувств мозгу и от мозга мускулам. Но это не может быть изложено вкратце, к тому же нет и достаточного запаса опытов, коими законы действия этого эфира были бы точно определены и показаны».

Так думал о единой картине мира Ньютон. Как много предстояло сделать: разделить разнородные явления, классифицировать их, чтобы можно было построить теорию. Ньютон стоял у истоков. Вряд ли мы сейчас знаем, как далек еще путь до истины.

## **ДЕЙСТВИЕ НА РАССТОЯНИИ**

Одна из наиболее трудных идей, против которой восставали самые крупные естествоиспытатели, была идея действия на расстоянии. Когда одно тело сталкивается с другим, механизм передачи импульса нагляден и понятен. Вращающаяся Земля увлекает воздух, а воздух, в свою очередь, несет с собой птиц в их полете. Казалось, тело не может действовать там, где

его нет, — таков был один из очевидных принципов философии.

Действие на расстоянии чем-то походило на идеи астрологов о действии звезд на человека. Ученые всеми силами стремились к изгнанию этого мифа из физики. Даже Ньютон пытался объяснить действие тяготения мельчайшими частицами эфира, наполняющими поры тел. Теории упругого эфира размножались и усложнялись. До конца XIX в. именно создание теории эфира считалось звеном, завершающим картину мира.

Нельзя не изумиться Иогану Кеплеру, который вопреки всем утверждал, что Солнце действует на планеты так же, как и Земля на Луну. Может быть, нарушить традицию Кеплеру помогло его занятие астрологией — он с удивительным чутьем умел извлекать ценные истины из неверных построений. В начале Кеплер говорил о душе Солнца и душах планет, на которые она действует. Такие слова не следует ставить ему в вину — в его время язык науки был очень беден. Тем не менее Кеплер впоследствии заменяет душу силой. Ему было ясно, что морские приливы обязаны своим происхождением притяжению Луны. Сейчас кажется непонятным, почему Кеплер не смог найти закон действия сил, хотя он и сравнивал действие Солнца с распространением света от точечного источника (интенсивность света падает, как квадрат расстояния). Скорее всего Кеплер не очень хорошо понимал, что такое сила, считая, например, что сила связана с плоскостью орбиты. При всем этом он был первый, кто серьезно говорил о действии на расстоянии.

### **СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГРАВИТАЦИИ**

Идею о действии тел на расстоянии пришлось принять хотя бы как рабочую гипотезу. Иначе понять законы движения планет было невозможно. Все считали, что надо найти какое-то объяснение силам тяготения, что надо связать эти силы с какими-то свойствами природы, которые можно было бы описывать законами механики, что должна быть среда — эфир, для передачи взаимодействия или частицы, которые осыпают тела градом ударов, это не мешало принять гипотезу Ньютона и, пока не задерживаясь на обоснованиях,



пойти дальше. Сила, заданная законом всемирного тяготения, была подставлена в уравнения Ньютона, и из этого возникла небесная механика, достигшая к концу XIX в. необычайного совершенства.

Но еще один вопрос не давал покоя физикам. Если тяготение распространяется через какую-то среду — эфир, то какова скорость распространения тяготения? Эту скорость пытались оценить, используя данные, полученные из наблюдений за планетами. Первую оценку сделал еще Лаплас. Его рассуждения были просты. Если скорость не бесконечна, то, очевидно, в закон всемирного тяготения надо подставлять не расстояние между телами в данный момент, а расстояние, которое было несколько раньше, в тот прошлый момент, который отстоит от настоящего на время, необходимое для распространения тяготения. Используя такую идею, можно было рассчитать силу, с которой Юпитер действует на Землю, возмущая ее движение.

Результат оказался неожиданным. Из наблюдений следовало, что если бы скорость распространения тяготения была даже в 10 млн. раз больше скорости света, то возмущение было бы обнаружено наблюдениями. Так и считалось, что эта скорость в невообразимое число раз превышает скорость света.

Ошибка эта продержалась до конца XIX в., хотя к этому времени физики уже знали об эффекте «запаздывания» из электродинамики и о том, что такой эффект в электродинамике приводит к значительно меньшей поправке. Ошибка Лапласа была в том, что поправка оказалась пропорциональной не первой степени скорости, а ее квадрату.

После открытия специального принципа относительности Пуанкаре понял, что эта скорость должна быть равна скорости света.

### **ТОЧНОСТЬ ЗАКОНОВ ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ**

В конце прошлого века, когда небесная механика достигла большого совершенства, можно было подумать и о том, насколько точен закон всемирного тяготения, с какой степенью точности можно быть уверенным, что силы взаимодействия изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния. В это время уже

знали, что существует расхождение в 38" (в столетие)\* между истинным движением и вычисленным возмущением движения Меркурия другими планетами. Для того, чтобы объяснить такое расхождение, надо было предположить, что показатель степени в законе всемирного тяготения равен не 2, а 2,00000016.

Лаплас думал, что тяготение поглощается в межпланетной среде и истинный закон тяготения имеет вид

$$F = \frac{\gamma m_1 m_2 e^{-\lambda r}}{r^2}.$$

Если объяснить движение перигелия Меркурия таким изменением закона, то надо положить  $\lambda = 0,00000038^{**}$ . Таким образом, к концу века было известно все, что следует знать о силах, — формула и ее точность. Тем не менее нельзя было понять, откуда взялся сам закон. Все попытки вывести его из уже известных физических законов терпели неудачу. Вероятно, надо даже говорить не о неудачах, а просто о том, что все механические модели оказывались очень неуклюжими и практически не могли быть даже проверены. Сейчас, оглядываясь назад, мы понимаем, что нельзя было создать правильную теорию тяготения, продолжая идти по путям развития физики XIX в.

Нужно было нарушить привычную логику и увидеть всю проблему совсем с другой стороны. Это и удалось сделать Эйнштейну.

### ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

Во всех рассуждениях о природе тяготения, которые велись в течение веков, не хватало двух компонент, которые на самом деле, хитро переплетаясь между собой, оказались самыми главными в теории. Никто не мог предположить, что обнаружится связь между наблюдениями Галилея над падением тел и рассуждениями о природе аксиом геометрии и что именно в этом заложено все самое главное, что необходимо для построения одной из самых совершенных теорий.

Галилею принадлежит честь открытия закона, согласно которому все тела на Земле падают с одинако-

---

\* Сейчас это расхождение считается равным 43".

\*\* Расчеты были сделаны Зеелигером в 1896 г.

вым ускорением. Наблюдая за качанием люстры в соборе, Галилей обнаружил, что период колебания маятника не зависит от амплитуды, а определяется только его длиной. Рассматривая маятник как падающее тело, он решил первую задачу механики. Галилей даже понял, что, измеряя период колебания маятника, можно измерить его длину.

Но самое главное состояло в том, что движение тел в поле тяжести Земли не зависело от массы. Заметить этот удивительный факт смог только Ньютон, так как только в его уравнениях механики масса встала на свое место и четко определилась роль силы.

Ньютон попытался проверить это явление на опыте. Он наблюдал качание маятников, сделанных из разных материалов, и не смог найти никакой разницы: период колебаний зависел только от длины маятника. Откуда следует, что масса тела, входящая в уравнение Ньютона (которая определяет, как меняется скорость тела под действием заданной силы), и масса тела, входящая в закон всемирного тяготения, есть одна и та же величина. Точнее, надо сказать, что эти две массы — инерционная и гравитационная — пропорциональны друг другу и что коэффициент пропорциональности для всех тел один и тот же. Эти две массы обычно просто полагают равными друг другу, только в законе всемирного тяготения пишут коэффициент — постоянную  $\gamma$ , а второй закон Ньютона пишут без коэффициентов.

Равенство двух масс называют сейчас законом эквивалентности. С этим законом мы постоянно встречаемся в обыденной жизни, хотя его порой не замечаем. Когда на весах взвешивают килограмм хлеба, никто не обращает внимания на то, что при этом сравнивают силу притяжения к Земле хлеба и гирь или же натяжение пружины и силу притяжения Земли. Во всех случаях равенство гравитационной и инертной массы считается очевидным.

Можно напомнить, как трудно объяснить в школе разницу между весом и массой, так эти понятия с детства перепутаны друг с другом в нашем сознании. Но посмотрим для контраста на поведение электрона в электрическом поле. Сила, действующая на электрон, равна  $eE$ , а его ускорение обратно пропорционально массе  $m$ . Отсюда следует, что движение электрона будет определяться отношением его заряда к массе  $e/m$ .

Эта величина для разных частиц и тел разная, и ничего похожего на принцип эквивалентности здесь нет. Ускорения  $\alpha$ -частицы и протона в поле тяжести относятся как 1 : 1, а в электрическом поле — как  $\frac{1}{2}$  : 1. В поле

тяжести роль заряда играет гравитационная масса — она определяет величину силы. Закон эквивалентности утверждает, что (в общепринятых единицах) отношение «гравитационного заряда» к массе для всех тел во Вселенной равно единице.

В таком виде закон утверждает значительно больше, чем было известно Галилею. Принцип эквивалентности говорит о любом гравитационном поле, а не только о Земле. Этот факт хорошо проверен по наблюдениям движения планет и Луны и сравнением их с расчетами. Несомненно, что Ньютона следует считать вторым отцом этого закона природы (который у самого Ньютона не отделялся от закона всемирного тяготения).

В XIX в. Бессель, наблюдая за качанием маятников из разных материалов, проверил закон эквивалентности с точностью до 0,1 %. В самом конце XIX в. — 1896 г. — венгерский физик Этвеш придумал способ проверки этого закона, основанный на совсем другом принципе. Идея Этвеша состояла в том, чтобы сравнить величину центробежной силы, возникающей из-за вращения Земли, с силой притяжения к Земле. Прибор его состоял из коромысла, подвешенного за середину на тонкой нити. К концу коромысла подвешивались два сравниваемых тела, гравитационные массы которых были, насколько это возможно, близки друг к другу\*, так что весы находились в равновесии. Если бы инертные массы пробных тел были разными, то на них действовали бы разные центробежные силы, в зависимости от того, куда направлен стержень — с востока на запад или с запада на восток. Измеряя закручивание нити, Этвеш не смог обнаружить никакого различия и заключил, что равенство двух масс, гравитационной и инертной, выполняется очень точно; ошибка не превышает  $10^{-8}$ .

Еще более точные опыты, использующие ту же идею, произвел в Москве В. Б. Брагинский, который уменьшил

---

\* Остающаяся разность масс погашалась в приборе тем, что коромысло немного наклонялось, компенсируя (изменением величины центробежных сил) малое несоответствие масс.

возможную ошибку до  $10^{-12}$ , так что мы можем с полным правом считать принцип эквивалентности одним из наиболее строгих законов природы\*.

### НЕЕВКЛИДОВА ГЕОМЕТРИЯ

Когда в 1863 г. казанский математик Лобачевский опубликовал свою «Воображаемую геометрию», многие его коллеги глумились над великим открытием. Так же не понят был и его венгерский современник Бойаи, независимо пришедший к возможности построения геометрии, отличной от геометрии Евклида.

Роль открытия Лобачевского многогранна. Помимо значения геометрии Лобачевского самой по себе, она заставила пересмотреть взгляд на математику.

Мы сейчас хорошо понимаем, что любая система аксиом может быть реализована не на одной модели, а на нескольких, весьма разных по своему физическому содержанию. И мы знаем, что вопрос о том, каким системам аксиом удовлетворяют соотношения между точками, прямыми, фигурами и т. д. нашего реального мира, не может быть решен путем размышлений, а должен быть исследован с помощью опытов.

Лобачевский и Гаусс думали о сумме углов треугольника, а последний даже пытался измерить эту сумму, но не достиг успеха. Сейчас мы знаем, почему он потерпел неудачу. Из-за гравитационного поля Земли сумма углов треугольника (плоского, а не нарисованного на сферической поверхности Земли) отличается от  $2\pi$  на величину  $\sim 10^{-9} (l/R)^2$ . Здесь  $l$  — длина стороны треугольника,  $R$  — радиус Земли. Если  $l$  составляет около 10 км, эта сумма углов будет больше  $2\pi$  на величину порядка  $10^{-15}$  радиана. Ясно, что заметить такое отличие практически невозможно даже сейчас.

Геометры прошлого века все же думали о реализации законов геометрии Лобачевского в обычном пространстве.

Только после открытия теории относительности Минковский обнаружил, что неевклидова геометрия нужна для описания четырехмерного мира, который объединяет пространство и время. Но геометрия Лобачевского

---

\* Для сравнения заметим, что закон сохранения энергии в ядерных реакциях проверен с точностью, не превышающей  $10^{-6}$ .

оказалась реализованной и в трехмерном пространстве. Зоммерфельд в 1909 г. показал, что в теории относительности вектора скорости складываются так, как складываются вектора в геометрии Лобачевского. Это значит, что если строить пространство не из векторов перемещений, а из векторов скоростей и если в пространстве скоростей строить из этих векторов треугольники, проводить параллельные прямые и т. д., то решать задачи о свойствах этих треугольников надо не с помощью формул обычной тригонометрии, а с помощью формул тригонометрии Лобачевского. По-видимому, это был первый пример практического использования формул «воображаемой геометрии». В наше время с помощью таких формул рассчитывают соударения быстрых элементарных частиц.

Но нас сейчас интересует не пространство скоростей, все-таки в некотором смысле воображаемое, а обычное пространство, в котором мы живем и работаем.

В 1854 г. в Геттингенском университете Риман читал свою первую пробную (она называлась тогда диссертационной) лекцию «О гипотезах, лежащих в основании геометрии». Этот доклад не был отмечен математиками — лишь через 14 лет его текст был опубликован Дедекиндом. А между тем в нем было сказано: ...«предложения геометрии не выводятся из общих свойств протяженных величин..., напротив, те свойства, которые выделяют пространство из других мыслимых трижды протяженных величин, могут быть почерпнуты не иначе как из опыта». Во времена Римана не было никого, кто бы оценил эту смелую мысль. Но хотя и не сразу, идея о существовании пространств с неевклидовой геометрией, все то, что сейчас называется римановой геометрией, превратилась к началу XX в. в плодотворную область математики.

Может быть, следует удивиться тому, что больше чем за полстолетия никто не смог сделать фактически ни одного шага на пути к выяснению геометрии реального мира. Почему так случилось? Сейчас, конечно, мы хорошо видим, в чем было дело.

Задача о природе тяготения развивалась совсем в другом направлении: физики истощали себя в попытках всунуть тяготение в одну из моделей эфира.

Принцип эквивалентности казался настолько триви-

альным, что никто не видел ни малейшей возможности извлечь из него какую-нибудь пользу.

Математики в конце прошлого века уже знали о разных геометриях, но никто не понимал, как можно определить геометрию мира, если отклонения ее от геометрии Евклида столь малы, что их нельзя обнаружить на опыте. Не существовало никаких уравнений, которые позволили бы что-либо сказать о реальном мире. Наконец, самое главное, не было еще понята та связь между пространством и временем, которая была установлена в специальной теории относительности.

Но вот в 1905 г. специальная теория относительности появилась на свет. Через два года Эйнштейн начинает свой анализ тяготения с задач об изменении хода часов в гравитационном поле и об искривлении луча света. Однако лишь через 8 лет Эйнштейну удастся найти уравнения для гравитационного поля.

Задолго до Эйнштейна Пуанкаре пытался объединить гравитацию и принцип относительности, но он ограничился обсуждением вопроса о скорости распространения гравитационного взаимодействия.

Был, правда, один физик, который ближе других подошел к правильному уравнению. Это был Нордстрем. Он считал, что гравитационное поле описывается скаляром и, исходя из этого предположения, построил последовательную теорию. Но Нордстрем не понял важности принципа эквивалентности, и его теория этому принципу не удовлетворяла. Не следует думать, что такое пренебрежение принципом эквивалентности сразу же приводило к конфликту с опытом. Силы тяготения настолько малы, что опытов в то время нельзя было поставить, и принцип эквивалентности никого, кроме Эйнштейна, не беспокоил. Но Эйнштейн был настолько уверен во всеобщем значении этого принципа, что сразу же отверг теорию Нордстрема, несмотря на ее математическую простоту и правдоподобность.

В том сложном положении, в котором оказалась теория тяготения в начале века, необходимо было найти какие-то общие принципы, которые, минуя эксперименты, позволили бы догадаться, как же должны выглядеть уравнения гравитации. Таким принципом оказался принцип общей ковариантности. Теорию тяготения называют общей теорией относительности; сейчас может показаться, что это название устарело, что свойства симметрии

уравнения не имеют принципиального значения и т. д. Однако только расширение рамок специальной теории относительности позволило Эйнштейну сделать почти невозможное — написать уравнение, которое не следовало ни из других уравнений, ни из результатов опыта. Оно возникло из рассуждений о том, что произойдет с уравнениями специальной теории относительности, если перейти из инерциальной системы координат в систему ускоренную. Если бы не был сформулирован принцип ковариантности, то решение задач о тяготении было бы отложено лет на 50, а проблемы поведения Вселенной, задачи космологии, быть может, и поныне оставались бы за пределами доступности для физики.

### **ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ И УСКОРЕНИЕ**

Идею общей ковариантности словами можно выразить очень просто. Уравнения движения должны быть написаны так, чтобы они не зависели от характера движения наблюдателя. Это требование кажется очень естественным, если понимать, что никакого эфира в природе нет и что все поля — электромагнитное, гравитационное и любое другое — существуют сами по себе, не требуя никакого другого материального носителя. Опять мы встречаемся с принципом, который кажется столь же очевидным, как и принцип эквивалентности. Если мы, стоя на берегу, смотрим на плывущий пароход, его скорость будет иметь одно значение, а если мы смотрим на него с борта другого парохода, скорость окажется другой. Когда мы из окна поезда смотрим на удаляющуюся станцию, мы воочию убеждаемся в относительности скорости. Кажется, здесь нет никакой науки, и никакой новой истины такими рассуждениями обнаружить нельзя. Но даже в таком простом «опыте» можно найти парадокс. Если скорость поезда и станции только относительна, то почему же электромоторы стоят на поезде, а не на станции?

Со словом «очевидно» надо обращаться осторожно. Продолжим «очевидные» рассуждения об относительности движения поезда и станции. Парадокс с электромоторами мы легко уничтожим, если скажем, что энергия уходит не на движение, а на преодоление трения между колесами и рельсами, которые неподвижны относительно станции. Но если очевидно, что скорость относитель-



на, то с той же степенью очевидности, казалось бы, должно быть относительно и ускорение.

Понятие об относительности ускорения таило в себе неожиданные трудности. Еще до открытия теории относительности Мах придумал парадокс, который поставил в тупик физиков. Представим себе, что в пустом мире вращается шар. Если существует какой-либо наблюдатель, не связанный с шаром, то можно считать, что шар вращается относительно этого наблюдателя. Но как можно говорить о вращении, если наблюдателя нет, а шар вращается в одиночестве в пустом мире? Представим себе, например, что на Венере, небо которой всегда покрыто густыми облаками, находится наблюдатель. Откуда бы он мог заключить, что его планета вращается? Относительно чего такой наблюдатель смог бы отсчитывать угол поворота? Когда говорят об относительности скорости, то в этом случае не появляется парадоксов. Равномерно движущийся корабль в пустом пространстве не отличим — согласно принципу относительности — от покоящегося корабля. На плывущем с постоянной скоростью корабле все явления — механические (по Галилею) и электромагнитные (по Эйнштейну) — происходят совсем так же, как и на покоящемся корабле. Поэтому движется корабль или покоится, можно узнать, только посмотрев на какой-то внешний ориентир. Никакими опытами в закрытой кабине корабля узнать об этом нельзя. Совсем иначе обстоит дело с вращением шара. Наблюдатель на Венере легко может узнать, что она вращается по силам инерции — центробежной и Кориолиса. Он узнает это по изменению силы тяжести на экваторе, по размытию берегов рек (конечно, если бы они были), по колебаниям маятника Фуко и разными другими способами. Наблюдатель на Венере сможет измерить величину ее угловой скорости. И он узнает угловую скорость саму по себе, абсолютно без отношения к какому-нибудь внешнему наблюдателю или какой-либо внешней инерционной системе координат. Это не может не показаться странным, и Мах, анализируя ситуацию, пришел к выводу, что силы инерции должны определяться массой неподвижных звезд, которые каким-то образом воздействуют на вращающееся тело. Мах даже считал, что вся масса тела — его инерция — каким-то образом связана со сферой неподвижных звезд и что в абсолютно пустом пространстве тело во-

все не обладало бы массой. До сих пор дискуссия по этому вопросу вспыхивает на страницах журналов. Пытались даже на опыте посмотреть, как движется тело по разным направлениям по отношению к плоскости нашей Галактики. Если бы Мах был прав, то масса тела, следуя неизотропному распределению масс в Галактике, должна была быть разной в разных направлениях — одна и та же сила сообщала бы телу разное ускорение, если бы она действовала в плоскости Галактики или в направлении, ей перпендикулярном. Опыт не обнаружил никакого эффекта.

Ключ к решению проблемы ускорения был найден Эйнштейном при решении задачи о лифте, свободно падающем в поле тяжести Земли. Можно заменить лифт спутником Земли, движение которого есть сложение прямолинейного движения по инерции и падения на Землю. Этот пример даже лучше, так как спутник в принципе может двигаться без конца (если забыть о сопротивлении атмосферы), а движение лифта по необходимости имеет начало и конец. На спутнике (если он мал по величине) сила тяжести отсутствует — экипаж и все предметы находятся в невесомости. Можно высказать предположение и (это сделал Эйнштейн), что никакими опытами внутри спутника (т. е. без связи с внешним наблюдателем) нельзя ни определить, движется спутник или покоится, ни узнать, находится ли он в поле тяжести Земли.

Переход в неинерциальную систему координат компенсирует полностью поле тяжести. Для большей точности подчеркнем, что все это верно, если мы можем считать внутри спутника поле тяжести однородным, т. е. ускорение силы тяжести одинаковым во всех точках спутника. Такое допущение, конечно, верно, пока размеры спутника можно считать малыми по сравнению с его расстоянием до центра Земли! Хотя сейчас невесомость, связанная со спутником, мало кому покажется неожиданной, явление долго было непонятным. Даже Жюль Верн со своим пророческим даром, правильно описав многие детали полета на Луну, считал, что невесомость реализуется только в одной точке пути — той, в которой притяжения Земли и Луны уравниваются между собой.

В опыте с падающим лифтом (или спутником) встретились два факта: принцип эквивалентности, утверждающий независимость ускорения в поле тяжести

от массы, и законы движения в ускоренной системе координат, также устанавливающие независимость ускорения сил инерции от массы тела. Эти два факта имеют, казалось бы, совсем разную природу. Ускорение сил инерции связано с простой кинематикой, переходом в недозволенную (ускоренную) систему координат, что дало основание многим считать эти силы фиктивными, не реальными. Ускорение силы тяжести связано с динамическим законом всемирного тяготения, с силой весьма реальной. Тем не менее эти силы могут компенсировать друг друга, что заставляет предположить у них одну и ту же природу. Таким образом и возникла идея, что ускорение и тяготение каким-то образом связаны друг с другом.

Рассуждения об ускорении могут все же показаться слишком простыми, и если привыкнуть к механике, то станет очевидно, что раз все тела падают с одинаковым ускорением, то никакого ускорения одного падающего тела относительно другого не будет. И все-таки на таком, казалось бы, простом пути можно натолкнуться на парадокс. Представим себе, что спутник представляет собой заряженный шар. Хорошо известно, что если электрический заряд движется с ускорением, то он излучает электромагнитные волны. Это явление используется для генерации радиоволн. Здесь и возникает естественный вопрос: будет ли излучать заряд на спутнике? С одной стороны, с точки зрения наблюдателя на Земле, заряд движется с центростремительным ускорением и должен излучать. С помощью формул электродинамики можно даже сосчитать энергию, которую спутник будет терять на излучение. С другой стороны, было высказано утверждение, что никакими опытами внутри спутника нельзя измерить его ускорение. С точки зрения космонавта скорее должен излучать заряд, оставленный на Земле, — так как именно он движется ускоренно относительно спутника. Между тем излучение электромагнитной волны есть физическое явление, и оно не может зависеть от системы координат. Не может быть, чтобы с одной точки зрения излучал заряд на спутнике, а с другой точки зрения излучал заряд на Земле, хотя бы потому, что, излучая, заряд теряет энергию и тормозится т. е. замедляется относительно системы отсчета. Интуитивно ясно, что излучать должен заряженный спутник — он будет замедляться, уxo-

дя, по закону Кеплера, на более далекую орбиту. Но интуиция может и подвести. Потом мы увидим, что решение этого парадокса родственно решению парадокса Маха. Сейчас же нам надо усвоить, что принцип эквивалентности не есть тривиальность, а есть вполне четкая физическая гипотеза.

## ГЕОМЕТРИЯ И МЕХАНИКА

Рассуждения об ускорении должны были заставить нас задуматься о возможных осложнениях, связанных со введением электромагнитного поля. Поэтому мы временно будем говорить только о движении частиц и распространении лучей света, оставив в стороне волновые процессы. Это значит, что мы ограничимся изучением траекторий частиц и лучей света и посмотрим, что с ними происходит, когда они попадают в поле тяжести.

Мы знаем, что законы движения планет в поле тяжести не зависят от их массы, что планеты с разными массами движутся одинаково. Это знал еще Кеплер, ибо в его законах массы планет не участвуют\*.

Таким образом, теория должна была быть построена так, чтобы в ней автоматически выполнялся принцип эквивалентности. Как это сделать, понял Эйнштейн. Надо отнести всей свойства движения в поле Солнца к свойствам пространства в окрестностях Солнца, решительно отвергнув ньютоновскую концепцию пустого евклидовского пространства, в котором, как на сцене, разыгрываются события, называемые физическими явлениями.

Понятие все это совсем не трудно. Для этого надо обратить внимание на очень близкую связь кинематики и геометрии. Когда утверждается, что материальная точка, движущаяся по инерции, описывает прямую линию, то в курсах механики не спрашивается, что такое прямая линия, — считается что прямая линия знакома всем. Но как провести прямую линию? По линейке? Та-

---

\* Масса Солнца входит в постоянную третьего закона Кеплера. Массы планет войдут, если учитывать возмущение, которое оказывает каждая планета на движение всех остальных. Это значит, что в точной задаче учитываются все возможные отношения масс, а потому массы планет оказываются существенными при более строгом решении.

кое решение не годится — надо проверить, прямая ли линейка. Можно предложить три способа — проследить, как движется точка по инерции, посмотреть, как распространяется свет, или просто натянуть нитку. Всекие другие способы окажутся усложнением трех перечисленных.

Первый способ явно ни к чему не приводит, так как мы не знаем, что такое движение по инерции (как проверить, что на тело не действуют силы?). Второй способ не лучше — мы не знаем, как распространяется свет, то, что он движется по прямой, было фактически постулировано. Если бы мы заранее знали, что в пространстве нет поля тяжести, то оба способа годились бы, но дело как раз в том, чтобы проверить, есть такие поля или нет. Третий способ, очевидно, зависит от поля тяжести — нитка прогибается из-за своего веса и не может служить эталоном.

Вывод напрашивается сам собой: мы не можем независимо определить геометрию пространства а затем движение тела по инерции. Пока математики знали лишь геометрию Евклида, все было просто. Все были уверены, что никакой другой логически непротиворечивой геометрии не существует, а потому и нет никаких сомнений в формулировке законов Ньютона. Но после открытий Лобачевского, Бойаи, Гаусса, Римана, когда понятия и язык неевклидовых геометрий перестали казаться экстравагантными, стало не очевидно, что геометрия Евклида должна быть справедлива в нашем пространстве.

Оказалось, например, что векторы скорости в специальной теории относительности складываются не как обычные векторы в евклидовом пространстве, а по законам геометрии Лобачевского.

Риман создал новую теорию, позволяющую рассматривать такое пространство, в котором законы геометрии могут быть разными в разных его точках. Как Лобачевский, так и Риман понимали, что только из опыта можно узнать о геометрии нашего мира.

Эйнштейн, кроме того, понял, что согласно специальной теории относительности, геометрию мира надо устанавливать не в трехмерном пространстве, а в четырехмерном пространстве-времени. Это значит, что в принципе геометрия грехмерного мира может быть разной для частиц, движущихся с разными скоростями;

только такая геометрия будет способна описать все многообразие возможных движений. Это утверждение есть простое следствие законов Кеплера, согласно которым на каждой орбите скорость планеты своя, определяемая третьим законом.

Таким образом, описание движения с помощью законов механики должно было превратиться в описание геометрии пространства.

Такое описание хорошо иллюстрируется геометрией обычной двумерной сферы, которую можно описывать двумя способами. Первый из них основан на свойствах шара в трехмерном евклидовом пространстве. Но можно действовать иначе, задавшись целью описывать все свойства сферы, не выходя в трехмерное пространство, а пользуясь только такими величинами, которые можно измерить на самой сфере. Оказывается, и это было доказано для любой поверхности Риманом, можно установить всю геометрию именно таким образом. Для сферы задача особенно проста; надо измерить только радиус сферы. Простой способ — совершить кругосветное путешествие. Тогда мы можем узнать радиус сферы, если нам кто-то сообщил, что мы живем на идеальной сфере. Но можно обойтись и без такого сообщения. Если мы аккуратно измерим углы треугольника, стороны которого составлены из дуг больших кругов, и определим, насколько эта сумма превышает  $180^\circ$  (найдем, как говорят, сферический избыток  $\delta$ ), а потом измерим еще и площадь треугольника  $S$ , то отношение  $S/\delta$  даст нам квадрат радиуса сферы. Мы можем теперь проверить идеальность сферы, измеряя это отношение в разных ее местах и для треугольников разных размеров. Так, например, если взять треугольник с вершинами на полюсе и в двух точках на экваторе на расстоянии  $90^\circ$  друг от друга, то у такого треугольника все углы прямые. Сферический избыток будет равен  $270 - 180 = 90^\circ = \pi/2$ , что дает для площади  $\pi R^2/2$ , т. е. как раз  $1/8$  площади всей сферы ( $4\pi R^2$ ).

Из этого примера видно, что свойства поверхности можно описывать и изучать, не сходя с самой поверхности, методами, как говорят, внутренней геометрии. Такое описание, очевидно не связано ни с какой внешней системой координат как это было бы при описании сферы в трехмерном пространстве, когда уравнение сферы по необходимости надо было связывать с какими-то те-

лами и вообще вводить на одно измерение больше, чем это нужно с физической точки зрения.

Подобно внутренней геометрии сферы, можно говорить и о геометрии четырехмерного пространства-времени. Можно описать все его геометрические свойства, не связывая описание ни с какой системой координат. Обычно говорят, что такое описание не должно изменяться, если мы заменим четыре координаты  $x, y, z$  и  $t$  любыми другими.

Если уравнения действительно не изменяются при переходе от одной системы координат  $x, y, z, t$  к другой  $x' = \varphi_1(x, y, z, t)$ ,  $y' = \varphi_2(x, y, z, t)$ ,  $z' = \varphi_3(x, y, z, t)$ ,  $t' = \varphi_4(x, y, z, t)$ , где  $\varphi_i$  — четыре почти произвольные функции, то такие уравнения называют ковариантными. Принцип общей ковариантности оказался очень важным, поскольку он дал возможность установить уравнения тяготения.

Таким образом, принцип эквивалентности и принцип специальной теории относительности объединились в общий принцип ковариантности.

### УРАВНЕНИЯ ТЯГОТЕНИЯ

Как бы ни была хороша физическая идея, она превращается в теорию только тогда, когда из нее возникают уравнения. Даже сейчас нас восхищает акт рождения общей теории относительности. Все, что было сказано выше, не дает на самом деле ключа для написания уравнения. С самого начала было ясно, что такое уравнение должно превращаться в предельном случае в уравнение Ньютона для потенциала. Было ясно, что оно должно связывать геометрические свойства поля с распределением вещества. Хотелось бы также, чтобы оно не противоречило уравнениям сохранения энергии и импульса. К сожалению, и математики еще недостаточно понимали геометрию Римана, чтобы сказать, какие пространства могут быть полезны физикам. Это сейчас к услугам физиков есть полная классификация разных пространств; в начале же века об этом еще ничего не знали. Было известно, что геометрию определяют 10 величин — 10 компонент метрического тензора. Если эти величины известны, все остальные можно вычислить. В частности, и можно определить, как выглядят линии, по которым должна двигаться матери-

альная точка. Такие линии называются геодезическими. В обычном пространстве геодезические — это обычные прямые. Естественно считать, что в пространстве искривленном, т. е. в пространстве, в котором справедлива неевклидова геометрия, роль прямых выполняют геодезические линии. В частности, на сфере геодезические — это большие круги.

Дальше остается только постулировать, что свободная материальная точка движется по геодезической — и механика построена. Но как определить уравнение, из которого можно найти 10 нужных величин?

Уравнение это должно определять не только геометрию мира в данный момент, но и описывать изменение геометрии со временем.

Уравнения должны также описывать, как изменяется ход часов в разных точках пространства. В специальной теории относительности все обстояло проще. Длина измеряется так же, как и в классической механике, время — обычными часами. Теория занимается тем, как изменяются длины и интервалы времени при переходе в движущуюся систему координат.

В поле тяготения все усложняется. Подобно тому как на двумерной сфере нельзя построить прямоугольной, декартовой системы координат, такой системы нельзя построить и во всем пространстве, если есть поля тяготения. Поэтому уравнения должны быть написаны в произвольной четырехмерной системе.

Точка в такой системе координат будет описываться четырьмя числами: тремя пространственными координатами и временем. Прямой будет называться не траектория частицы, а график ее движения (множество точек описывающих положение точки в разные моменты времени). Это значит, что геометрия должна быть четырехмерной.

Для сегодняшнего читателя четырехмерная неевклидова геометрия, наверное, не кажется парадоксальной. Когда Лобачевский впервые представил свою работу на суд математиков, то один из них написал в 1834 г. в журнале «Сын отечества»: «Многие из первоклассных наших математиков читали ее и ничего не поняли. После чего уже не считаю нужным упоминать что и я, продолжав над сею книгою несколько времени, ничего не придумал, т. е. не понял почти ни одной мысли...»

Вряд ли сейчас так скажет даже школьник. Четырех-



мерный характер геометрии можно понять таким образом. Что бы увидеть трехмерный мир, надо все точки этого мира увидеть одновременно. Но никакая информация не может быть передана мгновенно. Далекие точки мы неизбежно увидим в более ранний момент их существования, т. е. такими, какими они были давно. Глядя на небо, мы видим далекие галактики более молодыми, чем близкие. Картина мира, которая разворачивается перед нашими глазами, это не мир в какой-то избранный момент времени, а мир, в котором все объекты, лежащие на расстоянии  $R$  от наблюдателя, моложе наблюдателя на  $R/c$ . Говорят, что мы видим сечение мира световым конусом (каждая образующая этого конуса — график пути светового луча как функция времени).

В специальной теории относительности вместо длины появляется интервал  $\Delta S$ . Для двух близких мировых точек квадрат интервала между ними определяется  $(\Delta S)^2 = c^2 (\Delta t)^2 - (\Delta l)^2$ , где  $\Delta t$  — разность их времен, а  $\Delta l$  — обычное трехмерное расстояние. Эта величина не зависит от характера движения наблюдателя. Так, для света она всегда и для всех наблюдателей равна нулю; это значит, что  $(\Delta l)^2$  всегда равно  $c^2 (\Delta t)^2$ , т. е. что скорость света всегда равна  $c$ .

Такое выражение для интервала предполагает, что все направления в пространстве равноправны, т. е. что равноправны три компоненты  $(\Delta l)_x$ ,  $(\Delta l)_y$  и  $(\Delta l)_z$ , и что скорость света всегда равна  $c$ . Оба эти предположения оказываются нарушенными в поле тяжести. Вблизи Солнца, например, из-за его поля тяжести все длины вдоль радиуса вытягиваются по мере приближения к Солнцу, а все длины поперек этого направления сжимаются. Время же вблизи Солнца идет медленнее, а скорость света уменьшается. Такие утверждения проверены опытами на Солнце и на Земле. Путь луча от звезды искривляется, когда свет проходит вблизи края Солнца, как будто бы он попал в оптически плотную среду с показателем преломления  $n$ , большим единицы. Планеты двигаются не совсем по закону Ньютона, как будто бы в законе всемирного тяготения появилась маленькая добавка, обратно пропорциональная кубу расстояния, несколько вытягивающая орбиты планет. Часы на самолете, облетающем Землю, убыстряют свой ход на большой высоте из-за уменьшения поля тяжести.

Эффекты теории относительности давно перестали быть экзотическими, и ее формулами пользуются в разных областях физики и астрономии с полной надежностью.

Ясно, что если интервал имеет вид  $(\Delta S)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta l)^2$ , то в пространстве нет полей тяготения. Если же поле тяготения есть, интервал уже не может быть задан универсальным, а описывается 10 коэффициентами, которые могут быть в общем случае функциями координат и времени.

Эйнштейну удалось найти как раз 10 уравнений, которые определяют эти коэффициенты, если задано распределение масс, создающих поле. Впервые уравнения были решены для поля точечной массы. Это была задача о движении планет, так называемая задача Шварцшильда.

Задача Шварцшильда оказалась очень емкой. С ее решения началось развитие общей теории относительности. В этом решении оказались скрыты не только малые поправки к движению планет, но и совершенно новые явления, о существовании которых в классической физике никто не мог даже и предположить.

### **ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ**

Для поля тяготения, создаваемого массивным телом, можно сформулировать теорему, которая похожа на теорему Ньютона о поле сферически симметричного тела. Теорема эта носит имя Биркгофа. Суть теоремы Биркгофа состоит в следующем. Предположим, что поле тяготения создается системой тел, которые движутся в ограниченном пространстве. Тогда если распределение массы в такой системе сферически симметрично, а скорости все направлены по радиусам и также не зависят от углов, поле такой системы не зависит от времени и совпадает (вне системы) с полем материальной точки, имеющей массу, равную массе системы.

Следовательно, наблюдатель не может ничего заключить о распределении масс и скоростей внутри такой системы, если он ограничится только измерением силы тяжести. Поэтому, рассматривая задачу о поле Солнца, мы можем пользоваться решением задачи о поле точечной массы. Условия теоремы нарушаются, если источник поля вращается. В этом случае система теряет сферическую симметрию и остается с симметрией аксиальной.

Для Солнца эффект этот мал. Есть проект изучения взаимодействия поля вращающейся Земли с вращающимся же гироскопом. Этот эффект очень похож на взаимодействие двух магнитных моментов, каждый из которых создается движением электрических зарядов. Однако экспериментальные исследования гравитационных полей вращающихся тел очень трудны.

Но мы увидим, что в черных дырах вращающиеся поля оказываются весьма существенными.

Прежде всего мы можем оценить, какой величины должны быть те исправления, которые вносит теория тяготения в классические законы движения планет.

Ньютон не знал, что скорость не может быть больше скорости света. Посмотрим, когда скорость планеты достигнет скорости света, если считать по формуле механики Ньютона. Третий закон Кеплера в механике Ньютона можно записать так:

$$\omega^2 R^3 = \gamma M_{\text{С}},$$

где  $\omega$  — частота обращения планеты ( $2\pi/\omega$  — период);  $R$  — среднее расстояние планеты от Солнца;  $\gamma$  — постоянная тяготения и  $M_{\text{С}}$  — масса Солнца. Заменяя для круговой орбиты  $\omega$  на  $v/R$ , где  $v$  — линейная скорость, получаем:

$$v^2 R = \gamma M_{\text{С}}.$$

Скорость планеты достигает величины скорости света на расстоянии от Солнца  $R \approx \gamma M_{\text{С}}/c^2$ . Это и есть оценка расстояния от Солнца, на котором эффекты общей теории относительности будут очень велики. На самом деле мы просто сосчитали радиус, при котором первая космическая скорость (скорость на круговой орбите) будет равна (по механике Ньютона) скорости света. Можно приравнять ее второй космической скорости — так делал еще в 1796 г. Лаплас — и получить  $R_{\text{С}} = \frac{2\gamma M_{\text{С}}}{c^2}$ . Эта

величина играет важную роль в теории относительности и имеет специальное название — гравитационный радиус Солнца. Она обозначается  $R_{\text{гс}}$  и равна примерно 3 км. Аналогичная величина для Земли  $R_{\text{гз}} \approx 7$  мм.

Лаплас выводил свою формулу из равенства потенциальной энергии тела на звезде,  $\gamma m M/r$ , и кинетической его энергии, вычисленной по обычной классической формуле  $mv^2/2$ . Если приравнять эти две величины,

то их можно сократить на  $m$ . Так как Лаплас считал, что свет состоит из корпускул, то он подставил в формулу скорость света и пришел к заключению, которое он и изложил в 1798 г. во втором томе своего сочинения «Изложение системы мира»: «Светящаяся звезда с той же плотностью, что и Земля, а диаметр которой в двести пятьдесят раз превышает диаметр Солнца, не позволит ни одному из своих лучей достигнуть нас; возможно, что самые большие из светящихся тел по этой причине остаются невидимыми».

Аргументация Лапласа, конечно, неверна, но формула гравитационного радиуса остается той же и в общей теории относительности.

Лаплас сделал одно из самых удивительных предсказаний: он понял, что могут существовать «черные дыры». Проверим еще раз числа Лапласа. Из формулы для гравитационного радиуса видно, что  $R_{гр}$  растет пропорционально массе тела. Лаплас рассматривал звезду с плотностью, равной плотности Земли, а в этом случае массы звезд относятся как кубы их радиусов. Тогда радиус черной дыры  $R_d$  можно выразить через радиус Земли:

$$R_d = R_{гр\text{З}} \left( \frac{R_d}{R_{З}} \right)^3,$$

где  $R_{З}$  — радиус Земли, а  $R_{гр\text{З}}$  — ее гравитационный радиус.

Отсюда

$$R_d = \left( \frac{R_{З}}{R_{гр\text{З}}} \right)^{1/2} R_{З} \approx 3 \cdot 10^4 R_{З}$$

что превышает радиус Солнца примерно в 250 раз.

Для Солнца расстояния порядка его гравитационного радиуса лежат вблизи его центра.

В нашей планетной системе орбита Меркурия, ближайшей к Солнцу планеты, пролегает на расстоянии около 60 млн. км. Величина поправки к движению Меркурия должна быть по порядку величины равна отношению гравитационного радиуса Солнца к расстоянию до Меркурия. Эта величина имеет порядок  $\sqrt{5} \cdot 10^{-6}$ .

Поправки к движению Меркурия будут двух типов —

за счет изменения массы планеты со скоростью и за счет изменения закона тяготения.

Скорость Меркурия согласно все тому же третьему закону Кеплера больше скорости Земли (30 км/с) в корень из отношения их расстояния,  $\sim 1,7$ , т. е. составляет около 50 км/с, или  $1/6000$  от скорости света. Поправки обычно определяются квадратом отношения  $v^2/c^2$ , а значит, имеют порядок  $\frac{1}{36} \cdot 10^{-6}$ . В законе же тяготения, кроме обычного члена  $1/r^2$ , появляется член  $1/r^3$ ; что приводит к поправке того же порядка.

Последние астрономические измерения движения Меркурия дают согласие с предсказаниями теории с ошибкой не более 2%.

Некоторое время назад сравнение теории с опытом было поставлено под сомнение, когда Диккс заметил, что вывод может сильно пострадать, если Солнце хотя бы немного сплюснуто. Так, если оно сплюснуто только на  $10^{-4}$  ( $1 + 10^{-4}$  есть отношение длин осей эллипсоида, если Солнце — эллипсоид). Это приведет к изменению теоретического числа на  $7''$  в 100 лет. По-видимому, более точные наблюдения исключают даже такую малую сплюснутость.

Во всяком случае сейчас картина движения Меркурия выглядит так:

Если бы не было других планет и движение происходило бы по законам Ньютона, то Меркурий описывал бы эллипс. Эффекты, связанные с теорией относительности, приводили бы к смещению перигелия на  $41''$  в 100 лет. На самом деле полное смещение составляет  $575''$  в 100 лет, происходящее из-за взаимодействия с другими планетами (на долю Венеры приходится половина эффекта). Но механика Ньютона объясняет лишь  $534''$  — остальное осталось на долю механики теории относительности.

Напомним, что изменения в движении Меркурия сравнительно малы из-за того, что Меркурий все время находится далеко от Солнца. На расстояниях порядка одного-трех гравитационных радиусов (3 км для Солнца) поправки к закону тяготения были бы настолько велики, что нарушилась бы компенсация центробежной силы силой притяжения к Солнцу и планета упала бы на Солнце.

Для Солнца, размер которого во много раз больше

его гравитационного радиуса, такой области просто не существует. Однако для черных дыр все это выглядит весьма серьезно. Но об этом дальше.

### **ОТКЛОНЕНИЕ ЛУЧА СВЕТА**

В принципе с этим эффектом все просто. Свет, проходя мимо диска Солнца, должен к нему притягиваться, так как квант света обладает энергией, а следовательно, и массой. Движение в гравитационном поле не зависит от массы частицы, движущейся в этом поле. Поэтому свет в рамках механики Ньютона будет иметь ту же траекторию — гиперболу, что и комета. Такой факт был отмечен давно, и траектория луча света сосчитана еще в 1801 г.; для величины отклонения была получена величина около  $0,85''$ . Конечно, в то время никто не учитывал изменения закона тяготения. Правильный расчет из уравнений Шварцшильда дает вдвое большее отклонение. С точностью до 15% опыт подтверждает выводы теории. Самые точные опыты были сделаны при измерении углового расстояния двух далеких радиоисточников, когда они находились вблизи Солнца и когда Солнце уходило от них далеко по небу (через несколько месяцев). Из-за разного углового расстояния их от Солнца радиоволны от источников отклонялись по-разному. В результате наблюдатель регистрировал изменения их видимого взаимного углового расстояния. Трудности измерений связаны в основном с тем, что в разное время года условия наблюдения изменяются, и это затрудняет сравнение положения наблюдаемых объектов.

### **ЧАСЫ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ**

Изменение хода часов в поле тяжелой звезды обычно считают третьим фактом, подтверждающим общую теорию относительности. Теория этого явления очень проста. Если считать справедливым принцип эквивалентности, то полет кванта света от звезды к земному наблюдателю можно рассматривать так же, как полет космического корабля. На преодоление силы тяжести звезды квант должен затратить энергию, равную потенциальной энергии силы тяжести на поверхно-

сти звезды\*, т. е. величину  $\gamma M/R$ , где  $M$  и  $R$  — масса и радиус звезды соответственно.

Если считать справедливым закон сохранения энергии, то потеря энергии квантом должна сказаться в уменьшении его частоты. Поэтому свет, приходящий к нам от массивных звезд, должен иметь меньшую частоту, чем такой же свет на Земле. Это и есть эффект красного (т. е. в низкочастотную сторону) смещения спектральных линий.

Таким образом, наблюдение красного смещения позволяет проверить принцип эквивалентности для света.

В этом смысле красное смещение — эффект менее интересный, чем движение перигелия и отклонение луча света, которые частично (отклонение света — на половину, движения перигелия — на  $2/3$ ) зависят от изменения закона тяготения.

Красное смещение нужной величины наблюдалось на опыте, хотя точность наблюдений остается пока невысокой ( $\sim 10\%$ ).

Для того чтобы проверить существование красного смещения, не обязательно обращаться к помощи астрономов. Смещение спектральных линий, только ядерных, а не атомных, наблюдали и на Земле. Благодаря очень большой чувствительности современных методов ядерной спектроскопии к сдвигу энергии  $\gamma$ -квантов Паунду и Ребка удалось измерить разность энергии  $\gamma$ -линий радиоактивного железа при подъеме источника на 20 м над землей. Изменение энергии на такой высоте можно определить из формулы  $\Delta E/E = gh/c^2$ , что дает для относительного изменения энергии, или частоты, величину  $2 \cdot 10^{-15}$ . Именно такой сдвиг и наблюдался на опыте.

Еще более наглядная демонстрация красного смещения была сделана при кругосветном путешествии на самолете.

Два обычных рейсовых самолета приняли на свой борт физиков с точными атомными часами. Самолеты летели примерно на высоте 10 км со скоростью около 1000 км/ч и примерно за двое суток (с посадками) совершили полный облет Земли. Самолеты с точки зрения теории относительности были похожи на планету Мер-

---

\* Поле тяжести Земли пренебрегаем, так как речь идет об очень массивных звездах.

курий. На время их полета оказывали влияние два явления. Из-за скорости самолетов и вращения Земли часы на их борту отставали в соответствии со специальной теорией относительности, из-за большой высоты часы уходили вперед — влияние поля тяжести \*.

Скорость 1000 км/час почти равна скорости вращения Земли, поэтому при движении на запад первое явление — отставание часов — почти компенсировалось. Аккуратные расчеты с учетом маршрута полета, посадок, изменения скорости в полете предсказали, что при полете с запада на восток часы должны были отстать на 4 нс (нано-секунда- $10^{-9}$  секунды), а при полете с востока на запад уйти вперед на 275 нс. Так на самом деле и оказалось. Это была, по-видимому, самая дешевая проверка теории относительности.

### ВЕС НЕЙТРОНА

Красивую демонстрацию смещения частоты в гравитационном поле дает опыт по интерференции нейтронных пучков. Согласно квантовой механике нейтроны ведут себя как волны. Пропуская пучок нейтронов через кристаллы, можно повторить на нейтронах опыт Юнга — интерференцию двух пучков. Для этого с помощью кристаллов, которые играют роль призм и линз, пучок медленных нейтронов расщепляют на два пучка. Эти два пучка интерферируют, образуя ряд полос разной интенсивности, совсем как в обычной оптике.

Если вращать установку, то можно по желанию располагать два интерферирующих пучка либо в горизонтальной, либо в вертикальной плоскости.

Когда два интерферирующих пучка будут находиться в вертикальной плоскости, то нейтроны в верхнем пучке будут немного «легче» нейтронов в нижнем (на величину  $mg\Delta h$ , где  $\Delta h$  — разность высот). В результате, как и в опытах со светом, возникает разность частот у верхнего и нижнего пучков. Полоса интерференции должна сдвинуться. Это и наблюдалось на опыте (Оверхаузер, Корелла).

---

\* Часы уходили вперед, так как часы на Земле находились в большем поле тяжести, чем часы на самолете.



## **«ЧЕТВЕРТЫЙ ОПЫТ»**

Изменение хода часов можно в принципе проследить, измеряя время, которое нужно сигналу для того, чтобы дойти до какой-нибудь планеты и возвратиться обратно. Из-за гравитационных полей Солнца и планет это время должно быть больше, чем то, которое получается при вычислениях по законам ньютоновской механики. Замедление хода часов вблизи Солнца будет восприниматься земным наблюдателем как уменьшение скорости света — искривление луча света около Солнца можно воспринимать как его преломление в среде, в которой скорость света меньше, чем в вакууме.

Запаздывание радиосигнала, отраженного от Венеры, наблюдали на самом деле, и величина запаздывания находилась в приличном согласии с теорией (опять речь идет о точности около 10%).

Отметим, что сравнение теории с опытом идет с помощью эталона — атомных часов или радиолокационного устройства. Эти эталоны основаны на законах квантовой механики. Таким образом, мы сталкиваемся с опытами двух типов. При измерении отклонения луча света и движения перигелия Меркурия нам не нужны никакие квантовые эталоны, при других измерениях мы такие эталоны используем. Это замечание нам понадобится, когда мы будем обсуждать возможное изменение постоянной закона тяготения со временем.

Очень интересно, что в природе есть только одна фундаментальная скорость, одна постоянная действия (постоянная Планка), но много разных эталонов длин. Наиболее резко отличаются по своей природе два типа длин — те, которые можно составить из масс элементарных частиц (атомные длины, например,  $\hbar/mc$ ), и те, которые можно составить из масс планет, — их гравитационные радиусы (гравитационные длины).

## **ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ**

Общая теория относительности возникла из попыток объяснить явление тяготения. Закон Кулона о взаимодействии двух зарядов и закон всемирного тяготения, описывающий притяжение двух масс, так похожи друг на друга, что можно было бы ожидать, что тео-

рия тяготения могла быть похожей на электродинамику. Однако переходы от поля покоящегося заряда к полю движущегося и от поля покоящейся массы к полю движущейся оказались совершенно не похожими друг на друга. Принцип эквивалентности сделал уравнение тяготения совсем не похожим на уравнение Максвелла. С точки зрения современного теоретика, дело заключается в том, что электромагнитное поле описывается вектором (вектор-потенциал), а поле тяготения — тензором, который определяет геометрию пространства-времени. На языке квантовой механики это означает, что квант электромагнитного поля имеет спин, равный 1, а квант гравитационного поля (если все делать по аналогии) равен 2. Это на первый взгляд небольшое различие имеет очень далекие последствия. Самое главное состоит в том, что электромагнитное поле создается током и зарядом (они также образуют четырехмерный вектор). Само электромагнитное поле не несет с собой заряда, а поэтому оно не создает нового поля. Гравитационное поле создается массой, или, что то же самое, энергией. Говорят, что источником электромагнитного поля является вектор (четырёхмерный) тока, а источником гравитационного поля — тензор энергии и импульса. Из величин, характеризующих электромагнитное поле, *нельзя* образовать вектора тока; из величин, характеризующих поле гравитационное, *можно* составить тензор энергии-импульса. Гравитационное поле обладает энергией, а значит, и массой. Следовательно, гравитационное поле должно служить само источником дополнительного гравитационного поля.

В поле электромагнитном существует суперпозиция, поля складываются друг с другом, образуя суммарное общее поле. В достаточно сильном гравитационном поле принципа суперпозиции не существует. Формально отсюда вытекает, что уравнения гравитационного поля оказываются нелинейными. Именно это делает теорию гравитационного поля столь непохожей на теорию поля электромагнитного.

## КОСМОЛОГИЯ

Старая картина мира Ньютона была очень непоследовательна. Но многие годы физики, изумленные величиной физических идей и мощью математи-

ки, не очень огорчались отдельными недостатками модели. Трудности лежали где-то очень далеко от обычных масштабов, и казалось, что огромные расстояния и бесконечное время должны как-то сгладить эти трудности. А они все накапливались. В бесконечно пустом пространстве Ньютона вечно существуют звездные миры. Сколько этих миров: бесконечность? Как они распределены в пространстве? Они не могут сгрудиться в каком-то одном месте. Притяжение их не удержит в устойчивом состоянии. Постепенно (а времени на все хватает!) галактики как молекулы идеального газа разбегутся по всему бесконечному пространству. Поэтому в бесконечном пространстве должно быть бесконечное число звезд, галактик и других объектов, которые более или менее равномерно распределены повсюду. Таким образом, ньютоновская Вселенная предстает как бесконечное равномерное распределение вещества, которое только для нас на сравнительно малых расстояниях представляется неоднородным. Но если посмотреть, что должно происходить в такой равномерно заполненной Вселенной, мы обнаружим, что поля тяготения в ней должны быть бесконечными. В самом деле, рассмотрим поле в некоторой точке. Точка окружена со всех сторон веществом. На расстоянии  $r$  от нее находится слой вещества, масса которого, очевидно, равна  $\pi r^2 \Delta r \rho$ , где  $\Delta r$  — толщина слоя, а  $\rho$  — плотность вещества. По закону Ньютона это вещество создает в исходной точке поле, равно  $\gamma \Delta r \rho$ . Это значит, что поле от вещества во всем бесконечном пространстве ( $\Delta r \rightarrow \infty$ ) будет бесконечным. Если бы вещество было распределено абсолютно равномерно, то поля, конечно, не было бы (ему некуда было бы быть направленному) — внутри равномерного сферического слоя поле равно нулю. Но благодаря неравномерностям поле не исчезает и принимает бесконечно большое значение. Этот парадокс был известен давно — он назывался парадоксом Зеелигера. Решение искали в изменении закона тяготения, и катастрофы для теории никто не видел.

Другой парадокс похожий: он связан со светимостью неба. Если звезд бесконечно много, то к любому наблюдателю будет приходить свет с бесконечной энергией и температура Вселенной будет бесконечно расти. Доказательство такое же: каждая звезда излучает потоки света, плотность энергии в котором падает пропорци-

онально квадрату расстояния. Число же звезд растет прямо пропорционально квадрату расстояния. Отсюда, как и в случае парадокса Зеелигера, следует, что потоки энергии будут бесконечными. Спасти положение, казалось бы, можно тем, что свет поглощается в межзвездной среде. Однако поглощение ничего не изменяет: просто будет нагреваться эта среда и будет расти ее температура. Этот парадокс достаточно серьезен, и решить его в рамках ньютоновской картины мира нельзя.

Вообще заниматься в рамках ньютоновской механики строением Вселенной — занятие весьма неблагоприятное. Почти любые задачи приводят к бессмысленным бесконечностям.

В 1917 г. Эйнштейн опубликовал работу, в которой он попробовал подойти к задаче о Вселенной с позиций общей теории относительности. В этой первой работе было еще не все в порядке. Общие решения уравнений космологии еще не были получены, и Эйнштейн искал такое решение, которое отвечало бы конечной Вселенной. Многим такой вывод не понравился, и те, кто не понимал ни законов природы, ни законов развития науки, поспешили объявить его критическим для всей теории относительности. Эйнштейн рассмотрел модель статической замкнутой Вселенной. Это была, как мы сейчас знаем, неверная модель, но она вывела физиков из тупика и привела к рождению одной из самых фантастических наук — релятивистской космологии.

По правде говоря, Эйнштейн и не совершал никакой ошибки, он просто рассмотрел простую модель, которая имела важное свойство, — в ней не было парадоксов, о которых мы говорили выше.

Как можно было простейшим путем уничтожить бесконечности, о которых мы говорили? Самое простое — предположить, что мир конечен. Однако сделать это в рамках обычного трехмерного евклидова мира нельзя; значит надо попытаться использовать другую геометрию. Такой путь, естественно, вытекал из развития общей теории относительности.

В задачах, о которых мы писали выше, речь шла об изменении геометрии вблизи каких-либо тяжелых масс.

Теперь же надо было говорить о геометрии мира как целого. Такой необычайно смелой постановки вопроса никто еще себе не мог позволить. Ясно, что выяснить сколько-нибудь подробно, какова геометрия в далеких

от нас областях, будет нелегко. Первой моделью, которая была рассмотрена была модель Вселенной, замкнутой в четырехмерном пространстве. Для того чтобы представить, о чем идет речь, уберем одно измерение и рассмотрим поверхность трехмерного шара — двумерную сферу. Житель такой сферы, двумерец может обнаружить, что он живет в мире, площадь которого ограничена, — он может измерить эту площадь, как это сделали люди с поверхностью Земли. Двумерец может измерить радиус сферы, для этого он должен построить треугольники и измерить сумму их углов. Он обнаружит, что геометрия его мира есть геометрия поверхности положительной кривизны, и он может опытами показать, что она отличается от геометрии плоскости.

Примерно то же самое мы можем сделать в принципе в трехмерном мире, в котором мы живем. Мир, модель которого была рассмотрена Эйнштейном, обладает свойством, которое делает его похожим на сферу. В каждом месте такого мира треугольник имеет сумму углов, большую, чем  $180^\circ$ , на очень малую величину, определенную отношением площади треугольника к  $(2 \cdot 10^{28} \text{ см})^2$ . Все что двумерец обнаруживал (в смысле геометрии) в каждом месте сферы, житель модели будет обнаруживать в каждом месте своего трехмерного пространства. Это представить себе нетрудно; труднее представить весь четырехмерный шар целиком, но все, что делается в любой малой области его трехмерной поверхности, можно легко описать. В такой модели нет внутренних противоречий. Лишь привычка думать в терминах евклидова плоского пространства заставляет нас думать о сфере, как вложенной в какое-то большее пространство. Мы привыкли со школьной скамьи смотреть на геометрические тела извне, и нам трудно представить себе геометрию изнутри так, как вынужден себе ее представлять двумерец.

С общих точек зрения нельзя придумать серьезных возражений против замкнутой модели. Вопрос, что находится за границей четырехмерного шара, имел бы смысл только в том случае, если этот шар был бы погружен в пространство пяти измерений, — наглядности при этом не прибавилось бы.

Тем не менее такая простая модель обладает очень большим дефектом — она не удовлетворяет уравнениям тяготения. Физически это означает, что хотя модель и

консна, тем не менее силы притяжения в ней все же велики, и вещество не может оставаться в этой модели в покое — такая Вселенная должна была бы сжаться, схлопнуться в точку. Строя модели, надо все время помнить, что геометрия определяется распределением материи, и, задавая геометрию, мы автоматически получаем распределение плотности материи, которая совсем не обязательно должна находиться в покое. Но это было понято позднее (в 1922 г.) А. А. Фридманом. Для того чтобы спасти положение, Эйнштейн предположил (что допускалось уравнениями тяготения), что в мире существует равномерное отрицательное давление, которое, как в газе, расталкивает частицы вещества друг от друга. Это давление описывается в уравнениях коэффициентом, получившим название космологического члена. С тех пор не прекращается дискуссия о том, есть такой космологический член или нет.

Однако решение проблемы лежало совсем в другом направлении.

Даже если согласиться с существованием космологического давления, все же модель оказывается негодной.

В этой модели предполагается, что притяжение тел в точности компенсируется их расталкиванием из-за космологической постоянной. Но такая модель будет неустойчивой. Если плотность слегка уменьшится в каком-нибудь месте, то притяжение ослабнет, и плотность будет стремиться продолжать падать. Если, напротив, плотность увеличится, то притяжение возрастет, и давление уже не сможет удержать вещество от сжатия.

Поэтому роковой недостаток модели конечной изотропной Вселенной состоял в том, что такая модель попросту не могла бы существовать.

### **МОДЕЛЬ ФРИДМАНА**

Правильное решение задачи о геометрии Вселенной дал ленинградский математик Фридман.

Исследуя уравнение тяготения для Вселенной, наполненной однородным веществом, он обнаружил, что решение этих уравнений нестационарно, т. е. зависит от времени.

Поиски устойчивых статических решений оказывались бесплодными, притяжение надо было компенсировать движением, кинетической энергией вещества. Тя-

ким образом возникла новая модель — модель расширяющейся Вселенной.

Решение Фридмана можно описать так. Главное его свойство состоит в непрерывном изменении всех размеров модели. Расстояние между любыми двумя объектами, например, двумя галактиками, растет пропорционально самому себе. Иначе говоря, любые два объекта движутся друг относительно друга со скоростью, пропорциональной их взаимному расстоянию  $v = HR$ .  $H$  называется постоянной Хаббла.

Из величины  $H$ , скорости света и постоянной закона тяготения можно составить величину, имеющую размерность плотности. Назовем ее

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H^2}{8\pi\gamma}.$$

Характер решения Фридмана зависит от отношения реальной средней плотности вещества во Вселенной  $\rho$  к  $\rho_{\text{кр}}$ . Если мы обозначим его через  $\Omega$ , то решение получается разным в зависимости от того, будет ли  $\Omega$  больше, меньше или равно 1. Если  $\Omega > 1$ , решение будет конечным в пространстве. Так же, как и в первоначальном решении Эйнштейна, модель будет описываться поверхностью четырехмерного шара, только радиус этого шара будет расти со временем, достигать некоторого максимального размера, а потом сжиматься вновь. Такая модель называется закрытой моделью Фридмана.

Если  $\Omega < 1$ , то расширение модели будет продолжаться неограниченно; так же неограниченно будет падать и плотность вещества. Это открытая модель Фридмана. Геометрия в открытой модели совпадает с геометрией Лобачевского. Наконец, если  $\Omega = 1$ , расширение также будет происходить неограниченно, но геометрия остается все время евклидовой.

Во всех трех моделях есть общая черта. Хотя они в далеком будущем ведут себя совсем по-разному, все они имели начало. Во всех трех моделях в прошлом, во времена, отстоящие от нас на величину  $1/H$ , плотность вещества была очень велика (а может быть, и бесконечна). Во всех трех моделях развитие Вселенной имело свое начало. Это самый важный и неожиданный вывод, который принесла с собой релятивистская космология. Мы обсудим этот вывод после того, как посмотрим, ка-

кие факты, взятые из опыта, заставляют нас поверить в решения Фридмана, несмотря на их кажущуюся парадоксальность.

### РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

Разбегание галактик было обнаружено независимо от открытия Фридмана. Даже сам закон  $v = HR$  был открыт экспериментально Хэбблом, поэтому и коэффициент пропорциональности  $H$  назван в честь этого астронома. Во времена, когда работал Хэббл, расстояния были известны лишь для немногих объектов на небе. Хэббл обнаружил, что линии в спектрах далеких галактик смещены в красную сторону, так, как будто бы галактики удалялись от земного наблюдателя. Если объяснять смещение линий эффектом Доплера, то можно вычислить скорость объекта, а зная расстояния, найти соотношение между скоростью и расстоянием.

Определение расстояний до далеких объектов — дело очень деликатное. На первый взгляд даже непонятно, как это в принципе можно сделать. Нельзя же послать на далекую галактику сигнал и ждать, когда он придет обратно, — на это уйдут миллиарды лет. Если бы все галактики, или все квазары, или все скопления галактик были одинаковы, то по той яркости, которую мы наблюдаем, можно было бы оценить расстояние от них. Любой способ определения расстояния обязательно требует, чтобы мы знали довольно много о природе объекта и его эволюции. Последнее кажется совсем необходимым, так как приходится сравнивать галактики разных возрастов — далекую Галактику мы ведь видим совсем молодой.

Когда космология только начинала развиваться, в 30-е годы, пытались оценивать расстояния по изменению яркости переменных звезд определенного типа, считая их совершенно одинаковыми. В результате пришли к выводу, необычайно обрадовавшему противников общей теории относительности. Возраст Вселенной оказался равным 2 млрд. лет — меньше, чем возраст нашей Земли, который был оценен геологами примерно в 5 млрд. лет.

Однако ошибка была не в теории, а в способе измерения расстояний — в действительности яркость переменных звезд неодинакова. Сейчас есть другие способы



определения расстояний до далеких объектов. Здесь нет места их описывать, но нельзя не обратить внимание на очень веский аргумент в пользу их надежности: те объекты, для которых были определены расстояния и красное смещение, очень хорошо легли на прямую, которая описывается законом Хаббла. Так как сейчас закон Хаббла проверен до скоростей, отвечающих красному смещению 4,6 (т. е. увеличению длины волны в 4,6 раза по сравнению с исходной), то вряд ли можно ожидать нового серьезного изменения шкалы расстояний, разве что астрономы ошиблись на множитель, приуменьшили все расстояния в одинаковое число раз. Хотя такая возможность и не слишком вероятна, все же нельзя исключить дальнейшего увеличения всех масштабов Вселенной еще в 2—3 раза. Со всеми оговорками такого рода можно привести современное значение постоянной Хаббла:

$$H = 55 \text{ км/с на мегапарсек.}$$

Для этой постоянной пользуются необычной системой единиц, где скорость измеряется в км/с, а расстояние — в мегапарсеках ( $1 \text{ Мпс} = 3,26 \cdot 10^6$  световых лет  $= 3,08 \cdot 10^{24}$  см). Можно выразить  $H$  в  $\text{с}^{-1}$ . Тогда  $1/H = 18 \cdot 10^9$  лет  $= 5,7 \cdot 10^{17}$  с. Это и есть современное значение возраста Вселенной.

### ВОЗРАСТ ВСЕЛЕННОЙ

Все модели однородной и изотропной Вселенной обладают общим свойством — у них у всех есть начало. Все они с необходимостью приводят к выводу, что около 20 млрд. лет назад Вселенная находилась в основном в сверхплотном состоянии — математически даже в бесконечно плотном. Даже вывод о бесконечной плотности материи не нарушает строгости теории. Формально уравнение тяготения справедливо при любой плотности вещества, и выводы теории не теряют своей силы. Конечно, в реальном мире положение осложняется тем, что при очень больших плотностях существенное значение приобретут квантово-механические эффекты, эффекты, связанные с рождением элементарных частиц, и т. д. Поэтому мы не знаем, что на самом деле происходило на той стадии, когда мир был сверхплотным, хотя постепенно накапливаемые наблюдения позволяют надеяться, что и в этом вопросе можно будет разобраться.

Много времени было потрачено на то, чтобы выяснить, не существует ли решений уравнения тяготения (без космологического члена), которые бы не содержали особенности, модели, в которой плотность вещества никогда не обращалась бы в бесконечность. По-видимому, ответ на этот вопрос оказался отрицательным. Это было показано работами англичан Пенрозе и Хоукина и советских физиков Е. М. Лифшица, И. И. Халатникова и А. Белинского.

Когда мы говорим о возрасте Вселенной, то надо помнить, что означает возраст и по какой шкале мы его измеряем. Ясно, что год — время оборота Земли вокруг Солнца — единица времени, пригодная для описания событий тогда, когда речь идет о планетах. В мире большой плотности, в котором есть только атомные ядра и электроны, естественная единица времени будет связана с атомными частотами; в еще более плотном мире на сцену выйдут частоты ядерные, так что чем больше плотность, тем меньшие характерные времена будут соответствовать физическим процессам. Поэтому, хотя в наших земных годах возраст Вселенной конечен, но в этой конечной Вселенной произошло бесконечное множество событий. Можно считать, что для понимания шкалы времени более естественно пользоваться не самим временем  $t$  в нашем современном смысле слова, а его логарифмом  $\lg t$ . Когда  $t$  изменяется от 0 до  $T$  (современность), то  $\lg t$  изменяется от  $-\infty$  до  $\lg T$ . Обе шкалы времени одинаково хороши.

### ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА ВО ВСЕЛЕННОЙ

Для того чтобы сказать, какая из моделей Фридмана подходит для описания эволюции Вселенной, надо знать величину средней плотности вещества. Эту величину определить довольно трудно, и до сих пор астрофизики не знают ее сколько-нибудь надежно. Можно подсчитать, сколько есть светящейся материи. Если ее «размазать» равномерно по Вселенной, то получим для средней плотности величину порядка  $10^{-31}$  г/см<sup>3</sup>. Чтобы легче себе представить эту величину, отметим, что плотность  $1,6 \cdot 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup> отвечает 1 нуклону на кубический метр (н/м<sup>3</sup>).

Решение проблемы плотности упирается в то, что трудно оценить, сколько в межзвездном пространстве

находится темного вещества. Обычно считалось, что такого вещества немного, во всяком случае не больше, чем светящегося. Однако недавно мнения по этому поводу стали изменяться. Астрономы из Тарту (Я. Эйнасто и другие) считают, что в галактиках должно быть много невидимого вещества, иначе нельзя понять, почему некоторые галактики группируются в системы со спутниками. Если такая точка зрения правильна, то оценка средней плотности вещества увеличивается до  $10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>, т. е. до  $\sim 1$  н/м<sup>3</sup>.

### КРИТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ

Как мы уже говорили, теория дает следующее выражение для критической плотности, т. е. для плотности, которая лежит на границе открытой и замкнутой модели

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H^2}{8\pi\gamma}.$$

Формулу для  $\rho_{\text{кр}}$  нетрудно получить (не вполне строгим, конечно, образом). Для этого будем исходить из предположения, что в мире с  $\Omega = 1$  кинетическая энергия вещества сравнивается с потенциальной, т. е. в таком мире все частицы имеют точно вторую космическую скорость. Тогда при большей плотности модель будет связанной, а при меньшей все ее части будут разлетаться на бесконечность.

Возьмем некоторое начало координат (в любом месте) и материальную точку с массой  $m$  на расстоянии  $R$  от него. Скорость этой точки по закону Хаббла будет  $HR$ . Ее потенциальная энергия определится энергией притяжения шара радиуса  $R$  с постоянной плотностью массы  $\rho_{\text{кр}}$ . Приравнивая потенциальную и кинетическую энергию

$$v_{\text{пот}} = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_{\text{кр}} \frac{m}{R}, \quad T_{\text{кин.}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2}H^2 R^2 m,$$

получаем формулу для  $\rho_{\text{кр}}$ .

Из приведенного выше значения  $H = 55$  км/с. Мпс, получаем для  $\rho_{\text{кр}}$  значение

$$\rho_{\text{кр}} = 5 \cdot 10^{-30} \text{ г/см}^3 \approx 3 \text{ н/м}^3.$$

Отсюда для параметра  $\Omega$

$$\Omega \approx \frac{1 \text{ н/м}^3}{3 \text{ н/м}^3} = 0,3.$$

Таким образом,  $\Omega$  оказывается очень близким к единице и, значит, наша Вселенная описывается геометрией, близкой к геометрии Евклида. Этот факт, наверное, должен быть многим приятен, все-таки для нас в геометрии Евклида есть что-то родное и близкое. Тем не менее нельзя не удивиться, что в природе реализовалась именно эта возможность.

Обычно решая задачу с помощью теории размерностей, мы составляем из величин, имеющихся в нашем распоряжении, комбинацию нужной размерности, и ожидаем, что с точностью до коэффициента порядка единицы мы получили нужную формулу. При этом мы предполагаем, что искомая формула существует. Например, в простой задаче о маятнике мы предполагаем (или знаем из механики), что существует связь между длиной маятника, ускорением силы тяжести и его периодом. Сейчас мы столкнулись с обратной ситуацией. Мы случайно натолкнулись на формулу с правильной размерностью  $q = \frac{1}{3} q_{\text{кр}}$  и коэффициентом порядка единицы. Спрашивается: имеет ли эта формула какой-то глубокий смысл? Пока на этот вопрос ответа нет.

### ИЗМЕНЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ТЯГОТЕНИЯ

Примерно так рассуждал Дирак, когда он пришел к заключению о возможном изменении постоянной всемирного тяготения со временем.

В природе существуют по крайней мере две шкалы расстояний и времени. Одна, атомная, связанная с постоянной Планка, другая, космологическая, — с постоянной Хаббла. Кроме того, есть еще шкала, определяющая геометрию вблизи тяжелого тела, связанная с гравитационным радиусом этого тела, но она нас сейчас не интересует\*.

Атомная постоянная времени имеет порядок величины

$$T_{\text{ат}} \approx \frac{\hbar}{mc^2},$$

---

\* В свое время обсуждался вопрос о связи массы тела с массой Вселенной (если она замкнута, или какой-то ее частью, если она открыта). Так можно было установить связь между  $H$  и массой тел. Однако ничего разумного на этом пути не получилось.

где  $m$  — масса какой-то из элементарных частиц. Если  $m$  — масса электрона, то  $T_{\text{ат}} \approx 2 \cdot 10^{-21}$  с.

Составим безразмерную величину  $T_{\text{ат}}H$ . Для нее найдем

$$T_{\text{ат}}H \approx \frac{2 \cdot 10^{-21}}{6 \cdot 10^{17}} \approx 10^{-39}.$$

В природе мы, как правило, не встречаем столь больших чисел, так что появление такого числа должно вызвать удивление.

Но, оказывается, дело обстоит еще интереснее. Оказывается, что это число очень близко по величине к отношению двух типов сил, действующих между протоном и электроном, — кулоновских и ньютоновских

$$\gamma \frac{mM}{r^2} : \frac{e^2}{r^2} = \frac{\gamma mM}{e^2} \approx 1 \cdot 10^{-42}.$$

Если бы мы выбрали несколько другие значения масс, то согласие испортилось бы на 2—3 порядка, но все равно числа оказались бы близкими. Что это, случайное совпадение или закон природы, смысла которого мы не понимаем?

Предположим, что случайное совпадение маловероятно, и мы наткнулись на реальное равенство между величинами, определяющими эволюцию Вселенной, и константами микромира. Приравняем две величины и перепишем их так, чтобы выделились безразмерные множители\*

$$\frac{e^2}{\hbar c} \left( \frac{\hbar H}{mc^2} \right) \approx \frac{\gamma Mm}{\hbar c}.$$

Еще раз подчеркнем, что массы протона и электрона выбраны произвольно. Может быть, в формуле должна стоять масса пиона, определяющая радиус действия ядерных сил... Никаких соображений больше у нас нет, и все, что мы сейчас можем делать, это подгонять числа!

Эта формула интересна тем, что в нее входит постоянная  $H$ , которая изменяется со временем ( $1/H$  — воз-

\* Обратим внимание, что комбинация  $\frac{\gamma Mm}{\hbar c}$  безразмерна и похожа по своему строению на  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$ . Формулу можно рассматривать как связь между этими двумя постоянными,

раст, т. е. растет со временем). Остальные величины мы до сих пор считали мировыми постоянными. Значит, если формула претендует на то, чтобы быть реальной, то одна из фундаментальных постоянных должна на самом деле изменяться в ходе эволюции Вселенной. Мы можем с уверенностью сказать, что  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$  не изменилась за  $10^{10}$  лет. Такое смелое утверждение следует из идентичности структуры спектров объектов земных и отстоящих от нас на миллиарды световых лет; и та и другая характеризуются одинаковым тонким расщеплением линий, т. е. взаимодействием между спиновым магнитным моментом электрона и его орбитальным моментом. Таким образом, мы приходим к выводу, что изменяться может только постоянная закона тяготения  $\gamma$ . Конечно, не имеет смысла спрашивать, что изменяется на самом деле —  $\gamma$  или естественные единицы измерения, связанные с массами. Разумеется, мы считаем, что все измерения делаются с атомными эталонами, которые мы по определению считаем неизменными.

Тогда из написанной формулы следует вывод, что постоянная силы тяжести (измеренная в атомных единицах) должна изменяться как  $H$ , т. е. убывать пропорционально возрасту Вселенной. Формула, которая была написана по догадке, может быть экспериментально проверена! Современные средства наблюдения планет и возможности компьютеров дают возможность проанализировать с большой точностью соотношение между наблюдениями и предсказаниями релятивистской небесной механики (возникает и такая наука). Оказалось, что точность таких данных позволяет сказать, что если  $\gamma$  и изменяется, то не более чем на  $10^{-10}$  от своей величины в год. Так как  $H$  изменяется на  $\frac{1}{2} \cdot 10^{-10}$  от своей величины, то никаких выводов пока сделать еще нельзя. Совсем недавно, в начале 1975 г. появилось сообщение о результатах анализа наблюдений покрытия звезд диском Луны за последние 20 лет, из которых следует, что  $\gamma$  изменяется за год примерно на  $(6 \pm 2) \cdot 10^{-10}$  от своей величины. Это число совпадает с изменением  $H$  за год, как это должно быть по формуле Дирака.

Такими неожиданными дорогами порой развивается наука. Трудно было себе представить, что возраст Все-

ленной и ее эволюция выразятся в изменении фундаментальной постоянной  $\gamma$ . Но все же подождем делать вывод до более надежного подтверждения самого факта.

### РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Самое яркое подтверждение гипотезы о расширяющейся Вселенной и ее эволюции из состояния с большой плотностью было получено радиоастрономами, когда в 1965 г. обнаружили необычайно большие сигналы вблизи длины волны 7,4 см. Дальнейшие исследования показали, что существует целый спектр излучения в этой области, происхождение которого нельзя связать ни с какими видимыми источниками.

Однако существование такого спектра следует из общих соображений, если Вселенная развивалась из сверхплотного состояния. В начале плотность и температура в такой системе были очень велики. Происходили процессы рождения и уничтожения частиц — частицы обменивались друг с другом энергией. Но при расширении Вселенной температура падала и рождение частиц прекращалось. Процессы, легко протекавшие при высоких температурах, практически замирали. Теплообмен между разными частями Вселенной ухудшался. Когда плотность во Вселенной упала настолько, что энергия всех частиц уменьшилась до нескольких киловольт, фотоны почти перестали терять свою энергию на ионизацию атомов и оказались практически изолированными, как в термостате. Это значит, что фотоны сохранили воспоминание о той температуре, которая у них была в тот древний период, когда они перестали взаимодействовать с атомами (поэтому их и называют реликтовыми). Но Вселенная продолжала расширяться, с расширением росла и длина волны фотонов. Энергия фотонов продолжала падать, но уже по другим законам, не следуя за температурой окружающего вещества. Однако спектр фотонов оставался спектром равновесного излучения, в котором температура падала по тому же закону, по которому падала энергия фотонов, так что отношение  $\hbar\omega/kT$ , определяющее форму спектра фотонов, не изменялось. Такую необычную картину фотонного газа, равномерно заполняющего всю Вселенную, предсказывали теоретики (Гамов). Понадобилось

почти 30 лет, чтобы это теоретическое предсказание оправдалось.

Можно только удивляться, сколько разных предсказаний было сделано на ранних этапах развития теории относительности. Они были сделаны тогда, когда сама мысль об их экспериментальной проверке казалась безумной. На них не многие обратили внимание. Так было и с реликтовым излучением — о нем почти совсем забыли, а когда наблюдения дали первые указания на то, что реликтовое излучение существует, в это многие не могли даже поверить.

Пока наблюдения давали только точки со стороны длинных волн от максимума, спектр Планка оставался недоказанным. Но сейчас количество экспериментальных данных возросло, и можно с уверенностью считать, что Вселенная заполнена идеальным фотонным газом ( $\sim 10^3$  фотонов на  $\text{см}^3$ ), отвечающим абсолютной температуре  $2,8^\circ\text{K}$ , что также хорошо согласуется с теоретическими оценками. Можно ли ожидать лучшего аргумента в пользу решений Фридмана?

### АБСОЛЮТНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ

Существование реликтового излучения в принципе дает возможность определить систему координат, которую с большим правом можно считать «самой инерциальной».

Так как Вселенная эволюционирует, в ней нет полной однородности по времени. Нет в ней и однородности в пространстве, так как объекты, находящиеся на разных расстояниях от наблюдателя, он видит на разных стадиях эволюции (хотя бы с разным красным смещением). Прежде всего это видно из спектра реликтового излучения. Спектр равновесного излучения не подчиняется принципу относительности: каждый из наблюдателей, движущихся с отличными друг от друга скоростями, из-за доплеровского смещения будет видеть свою собственную, отличную от других, форму спектра. Поэтому наблюдатели, находящиеся в разных областях Вселенной, могут, не связываясь друг с другом, определить, что они все находятся, например, в покое относительно реликтового излучения, если все они видят, что спектр имеет вид равновесного. Наоборот, по отклоне-



нию формы спектра от равновесного можно определить и «абсолютную» скорость движения наблюдателя.

Такие опыты проделывались на Земле. Наблюдая за доплеровским смещением спектра, удалось установить (кажется, не вполне еще надежно), что Земля вместе со всей солнечной системой движется со скоростью около 300 км/с в направлении созвездия Девы.

### ПАРАДОКС МАХА

Нам надо еще вернуться к парадоксу с вращающимся шаром. Парадокс состоял в том, что казалось трудно понять, относительно чего же вращается шар и почему на нем возникают силы инерции. Мах думал, что эти силы связаны со звездами, — идея, идущая, конечно, от Кеплера. Как и во всяком парадоксе, в рассуждениях есть прямая ошибка. Парадокс существовал бы и представлял вызов физикам, если бы вращающийся шар можно было рассматривать как связанный лишь с малой областью пространства. В действительности шар окружен собственным гравитационным полем, о котором мы ни в коем случае не должны забывать, если хотим разобраться в силах инерции. Далее, надо рассматривать не шар, который вращался всегда, начиная от  $t = -\infty$ , так как такого момента просто не было, а считать, что он начал вращаться в какой-то определенный момент  $t = 0$  (для парадокса это существенно). В этот момент у шара было статическое поле, заполняющее все пространство. Когда шар начал вращаться из-за конечности скорости распространения гравитационного поля, на больших расстояниях оно начнет изменяться позже, чем на малых, и всегда найдутся такие расстояния, до которых в заданный момент информация о вращении шара еще не дойдет.

Поэтому шар вращается не относительно какого-то наблюдателя — какую связь между таким наблюдателем и силами инерции можно указать? — а относительно своего собственного гравитационного поля на больших расстояниях. Когда шар начинает вращаться, поле закручивается хитрым образом, подобно лучу прожектора, вращающегося в начале координат. Такое закрученное поле и эквивалентно полю сил инерции во вращающейся системе координат, связанной с шаром.

Таким же образом разрешается парадокс с зарядом,

который находится в падающем лифте. Парадокс состоит в том, что этот заряд, подчиняясь принципу эквивалентности, не должен излучать. В задачу входит тот же вопрос — относительно чего ускоряется заряд? И опять непонятно, какое может иметь отношение наблюдатель на Земле — инерциальная система координат — к излучению заряда?

Рассуждать надо так же. Когда лифт начал падать, электромагнитное поле электрона на бесконечности (естественно, вне лифта, в этом и состоит нелокальность) остается в покое. Ускоряясь, электрон как бы растягивает поле, деформирует его. Если ускорение большое, электрон как бы выскакивает из собственного поля. Естественно, что на такое возмущение следует реакция — электрон излучает, часть энергии, идущей на восстановление разрушенного поля, уходит из системы. Таким образом, ускорение электрона на самом деле абсолютно: электрон ускоряется относительно собственного поля. Ничего похожего нет у наблюдателя на Земле. Заряд в его руках все время покоится относительно своего поля, и тот факт, что с точки зрения наблюдателя в лифте этот заряд ускоряется, никакого отношения к физической задаче не имеет.

Оба примера хорошо иллюстрируют, как аккуратно надо обращаться с ускоренными телами и как просто тогда разрешаются все парадоксы. Такую стройную теорию, какой представляется сейчас теория относительности, поставить в тупик до сих пор никому не удавалось. Ее трудные места и возможные парадоксы давно известны, хотя и не всегда легко увидеть их решение.

### **ПАРАДОКС ЧАСОВ**

Поскольку мы заговорили о парадоксах, можно еще вспомнить о парадоксе часов, который был излюбленным аргументом против теории относительности.

Действительно, говорили оппоненты, если с Земли уедет путешественник и, пропутешествовав с большой скоростью некоторое время, вернется обратно на Землю, он найдет жителей на Земле сильно постаревшими, ибо в движущейся системе координат время идет медленнее. Но, с точки зрения путешественника, двигалась Земля — почему же постарели жители Земли? В другой

форме задавал тот же вопрос Эддингтон, который говорил, что его удивляет, почему, едучи в Эдинбург, он очень устает из-за плохой дороги, а приехав туда, он находит эдинбуржцев свежими — как же они не устали, когда ехали к нему?

Читатель понимает, конечно, в чем дело. Ускорение не относительно. Переход в неинерциальную систему координат приводит к появлению гравитационных полей. Поэтому житель Земли в момент поворота путешественника в обратный путь попадает в сильное гравитационное поле, которое вызывает синее смещение — ускорение часов (как в опытах с радиоактивным железом на башне). Это смещение полностью компенсирует эффект замедления часов при их равномерном движении. Не надо даже производить подробного расчета: формулы теории относительности таковы, что они автоматически дадут один тот же ответ независимо от того, в какой системе координат производились вычисления.

Иногда выражают сомнение, на самом ли деле путешественник будет выглядеть более молодым, вернувшись домой и сможет обнаружить, что его дети стали старше его? Конечно, к биологическим процессам надо относиться с осторожностью; ясно, что эффект перегрузки при ускорении, режим полета будут, может быть, тоже существенны. Поэтому лучше не пользоваться биологическими примерами без необходимости\*. Но так как биологические процессы в клетках связаны с электрическими полями и с атомными процессами, которые подчинены формулам теории относительности, то нет оснований сомневаться в том, что элементарные реакции будут отзываться на переходы в разные системы, следуя теории. Вопрос лишь в том, будет ли это главным эффектом.

Когда человек трясется в машине на плохой дороге, то, с его точки зрения, подпрыгивает и падает все кругом машины. Эдинбуржцы прыгают с тем же ускорением, что и их окружение, поэтому их ничего и не беспокоит. Но «прыгающая» дорога задевает и трясет машину; именно это не нравится остроумному пассажиру. По той же причине падают чемоданы с полок, если поезд внезапно затормозился около станции, и не надо

---

\* Остановить время можно и для лягушки, если ее заморозить. Но это никакого отношения к теории относительности не имеет.

делать изумленные глаза и спрашивать, почему пассажиры на перроне не ощутили толчка? Посмотрите внимательно: есть разность ускорений поезда и чемодана, и ее нет у встречающих на перроне и самого перрона. Отсюда видна разница.

Можно еще раз повторить, что математический аппарат теории с самого начала был выбран таким, чтобы расчеты не зависели от системы координат, и искать противоречий в формулах теории сейчас столь же бесплодное занятие, как пытаться найти в евклидовом мире квадрат, диагонали которого были бы не перпендикулярны. Геометрию уже давно никто не пытается опровергнуть софизмами. Сейчас мы видим, сколь беспомощны были все попытки найти противоречия и в теории относительности.

### ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ

Мало кто сомневается в том, что гравитация распространяется с конечной скоростью и что эта скорость совпадает со скоростью света. Тем не менее этот фундаментальный факт не был до их пор подтвержден опытом.

Естественным желанием физиков было обнаружить гравитационные волны, которые похожи на электромагнитные (радио) волны, излучаемые ускоренным зарядом. Два обстоятельства делают такой опыт трудным. Первое — очевидное: гравитационное взаимодействие много слабее электромагнитного, а поэтому его трудно детектировать. О втором обстоятельстве надо сказать подробнее. Предположим, что мы рассматриваем систему из двух электронов. Такая система излучает существенно слабее, чем система из электрона и позитрона или система из позитрона и протона. Оказывается, что если в системе зарядов все частицы имеют одинаковое отношение заряда к массе, то интенсивность излучения сильно падает, примерно в  $(\lambda/a)^2$  раз, где  $\lambda$  — длина волны излучения,  $a$  — размеры системы.

Это происходит потому, что в такой системе ее центр тяжести совпадает с центром заряда, и она ведет себя почти как неподвижный заряд.

В случае гравитационного излучения все частицы имеют одно и то же отношение «гравитационного заряда» к его массе (следствие принципа эквивалентности), и

поэтому в любой системе это излучение квадрупольно.

Источник гравитационного излучения очень трудно сделать искусственно; пока основные надежды возлагаются на крупные космические события. Такими событиями может быть, например, образование черной дыры. Гравитационные волны должны излучать и двойные звезды. Однако интенсивность такого излучения мала. Можно привести формулу для интенсивности излучения двух тел с массами  $m_1$  и  $m_2$ , обращающихся вокруг общего центра тяжести. Если  $2a$  — среднее расстояние между телами, то потеря энергии на излучение гравитационных волн в 1 секунду описывается формулой

$$L = \frac{32}{5} \frac{Y^4}{c^5} \frac{1}{a^5} \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)^2 (m_1 + m_2)^2.$$

Для Юпитера такая формула дает  $5 \cdot 10^{10}$  эрг/с (для сравнения световое излучение Солнца  $4 \cdot 10^{33}$  эрг/с). Для типичной двойной звезды излучение составляет величину порядка  $10^{31}$  эрг/с (двойная  $UV$  в созвездии Льва). Однако из-за большого расстояния до Земли ( $\sim 200$  световых лет) поток энергии на Земле оказывается ничтожно малым —  $3,5 \cdot 10^{-12}$  эрг/с  $\cdot$  см<sup>2</sup>. Зарегистрировать гравитационное излучение двойной звезды есть необычно трудная задача.

Несколько лет назад были опубликованы сообщения о том, что зарегистрированы волны с интенсивностью, во много раз превышающей самые оптимистические предсказания. Однако тщательные проверки в нескольких лабораториях (в том числе и в лаборатории В. Б. Брагинского в Москве) не подтвердили этого открытия. Гравитационные волны продолжают оставаться неизвестными экспериментатору. Между тем они играют свою роль в эволюции Вселенной, поскольку могут существовать без всяких источников и описывать изменяющуюся со временем геометрию Вселенной. В отличие от электромагнитных волн гравитационные взаимодействуют друг с другом, и можно думать, что на ранних этапах эволюции они могли влиять на развитие событий.

### ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Мы перейдем сейчас к описанию истории, полной надежд и разочарований. В этой истории речь пойдет о самом удивительном явлении, о котором до от-

крытия теории относительности не мог подумать самый неистовый фантаст.

Действительно, дырка в небе, дорога никуда, ворота в мир, откуда нет возврата, — все это звучит довольно мрачно, но правильно описывает те события, которые происходили бы около черных дыр, если такие где-либо существуют.

О звезде, которая не выпускает свой свет, писал, как мы уже говорили, в конце XVIII в. Лаплас. Он был верным последователем Ньютона и считал, что свет состоит из мельчайших корпускул. Если вспомнить, что законы падения тел не зависят от массы тела, то можно понять, почему Лаплас предположил, что формула для минимальной скорости, которую должно иметь тело, чтобы вырваться из земного притяжения (2-я космическая скорость), верна и для световых корпускул. Формула для 2-й космической скорости имеет вид

$$v^2 = \frac{2\gamma M}{R}.$$

Подставляя вместо  $v$  скорость света  $c$ , получаем соотношение между массой звезды и ее радиусом, при котором свет еще может преодолеть силу тяжести и уйти от звезды к далекому наблюдателю. Вспоминая определение гравитационного радиуса,

$$R_{\text{гп}} = \frac{2\gamma M}{c^2},$$

мы приходим к заключению, что если радиус звезды меньше ее гравитационного радиуса, то такая звезда не может излучать свет.

Строгий вывод по всем правилам общей теории относительности дает тот же результат (даже с той же двойкой). Об этом предсказании Лапласа было забыто, и современный этап истории начался в 30-х годах, когда обнаружилось, что очень тяжелый шар не сможет устоять против собственных сил тяжести и сожмется, схлопнется до очень маленького объема, совсем как замкнутая Вселенная на этапе сжатия. Есть ли на самом деле такие исчезнувшие звезды, никто ответить тогда не мог.

Постепенно вопрос стал проясняться. Когда звезда в процессе своей эволюции остывает, то она, сжимаясь, уменьшается в объеме, так как медленные молекулы не

могут сопротивляться полю тяжести звезды. Давление в звезде возрастает, и если масса звезды не очень велика — меньше или порядка солнечной, то при сжатии звезды ее плотность станет настолько большой, что атомы соприкоснутся друг с другом, и дальнейшее сжатие прекратится. Звезда кончит свое существование в виде белого карлика, холодной глыбы без каких-либо эффектных свойств. Такая судьба ожидает и наше Солнце\*.

История станет интересней, если звезда имеет массу, немного большую, чем Солнце. Тогда поле тяжести может оказаться столь большим, что атомные оболочки будут раздавлены падающими частицами, электроны втиснутся в ядра, и от всей звезды останется небольшой (с нашу Землю) шар, состоящий из одних нейтронов. Так возникает пульсар, существование которого было предсказано Бааде и Цвикки в 1933 г. и Л. Ландау в 1934 г. Предсказание, как оно ни было красиво, оставляло мало надежды на реальное открытие нейтронной звезды. Как можно было говорить о наблюдении объекта столь малого и холодного? Но в природе ничего не спрячешь, нейтронная звезда окружена очень большим магнитным полем, которое фокусирует ее рентгеновское излучение. Кроме того, нейтронная звезда вращается, так что наблюдатель на Земле периодически (с периодом обычно около 1—2 с) попадает в плоскость, в которой собрано ее излучение. Пульсары не имеют прямого отношения к общей теории относительности, и мы о них говорить не будем. Однако одно свойство пульсаров полезно отметить. Период «мигания» пульсара выдерживается с необычайной точностью. Некоторые пульсары могут отсчитывать время с точностью великолепных часов. Периоды таких пульсаров измерены до девятого знака, так что во Вселенной развешаны своеобразные очень точные часы.

Если же звезда окажется тяжелее Солнца в 2—3 раза, то и нейтроны не смогут противостоять давлению падающих масс. Звезда будет продолжать сжиматься, пока ее последние части не исчезнут для внешнего наблюдателя за гравитационным радиусом. Что все это значит, мы постараемся рассказать подробнее.

---

\* В процессе эволюции звезда может взорваться, образуется Новая, и весь ход событий окажется другим.

Вернемся к движению в поле точечной массы. В старой ньютоновской механике движение частицы в таком поле описывалось законами Кеплера. Какова бы ни была эта частица, с ней могло случиться только одно из двух: если ее энергия велика, то частица покинет поле и улетит прочь на бесконечность, если ее энергия мала, она будет обращаться вокруг поля по одной из орбит — эллиптических и круговых. Частица ни при каких условиях не может упасть на центральную массу — это может произойти только в том случае, если она будет двигаться по прямой, проходящей через центр поля, — для этого ее момент количества движения должен быть строго равен нулю.

Мы уже знаем, что реальный закон притяжения отличается от закона обратных квадратов и что движение планеты отличается от того, которое описывается механикой Ньютона так, как будто бы в законе всемирного тяготения есть член, обратно пропорциональный кубу расстояния. Такое описание приближенное, но оно показывает, как усложняется задача, когда приходится учитывать эффекты, связанные с теорией относительности. Силы, обратно пропорциональные кубу расстояния, очевидно, на достаточно малых расстояниях могут сколь угодно превысить силы центробежные. Поэтому в таком поле мы должны ожидать существенно другого характера движения частиц, если они попадают в область, близкую к центру притяжения.

Действительно, в поле центральной массы при расстояниях, меньших гравитационных радиусов, частица не может двигаться устойчиво по круговой орбите. Если еще при этом частица имеет не очень большой момент количества движения и энергию то она не сможет уйти на бесконечность и будет описывать незамкнутую траекторию типа спирали, с каждым витком все больше и больше приближаясь к центру. На каком-то витке частица пересечет центральное тело — этим и завершится ее история, частица упадет на центр.

При таком движении скорость частицы будет возрастать, поскольку должен сохраниться момент количества движения, и уменьшающаяся потенциальная энергия будет восполняться растущей кинетической. Если центральное тело больше своего гравитационного радиуса, то



практически таких орбит не будет. Но если, а это и есть черная дыра, вся масса центрального тела сосредоточена на расстояниях, меньших гравитационного радиуса, то внешний наблюдатель никогда не уследит, как частица упадет на центральное тело. Для него история частицы закончится на том, что частица дойдет до гравитационного радиуса и исчезнет. Такое удивительное событие произойдет из-за красного смещения. Двигаясь по своей траектории — спирали, частица будет попадать все в более и более сильные поля тяготения, и спектр ее излучения будет сдвигаться в красную сторону, пока не погаснет совсем. Формально это произойдет в тот момент, когда частица достигнет гравитационного радиуса, на что ей потребуется, с точки зрения внешнего наблюдателя, бесконечное время.

Частица будет падать так долго в силу действия того же гравитационного поля, в котором замедляется ход часов. Практически, однако, внешний наблюдатель проследит за падением частицы за конечное и даже не очень большое время. Когда длина волны излучения, по которому наблюдатель следит за частицей, изменится в несколько раз, частица практически исчезнет из поля зрения, так как интенсивность ее излучения станет слишком малой.

В механике столкновений существуют удобная величина которую называют прицельным параметром  $q_0$ . Так называют расстояние, на котором тело прошло бы от центра сил, если бы взаимодействия не было и его траектория была прямой линией.

Результат расчетов траекторий планет в точной теории тяготения сводится к тому, что если планета (правильнее ее называют кометой, или просто материальной точкой) начнет свое движение на бесконечности с маленькой скоростью  $v_0$  и если ее прицельный параметр меньше, чем  $2R_{\text{гп}} \frac{c}{v_0}$ \*, она попадет в конце концов на шварцшильдовскую сферу. Если  $v_0$  равно скорости света (например, если рассматривать не комету, а луч света), то также может произойти падение, только критическое значение прицельного параметра будет несколько больше; он будет равен  $3\sqrt{3}R_{\text{гп}}$ .

Центральное тело из-за изменения закона притяже-

---

\* Ее момент количества движения  $L = mv_0q_0 \ll 2mcR_{\text{гп}}$ .

ния, оказывается, ведет себя не как точка, а как сфера с конечными размерами, эффективный радиус которой разный для частиц с разной скоростью.

### **ЧТО ВИДИТ ПАДАЮЩИЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ**

Итак, с точки зрения наблюдателя, находящегося вдали от черной дыры, частица, попав в гравитационное поле такой дыры и прокрутившись некоторое время по сжимающейся спирали, постепенно покраснеет и потемнеет, а затем исчезнет из глаз.

Долгое время думали, что на расстоянии от центра, равном гравитационному радиусу, в пространстве происходит что-то необычное, что существует некая сфера Шварцшильда (с радиусом, равным гравитационному радиусу), которая непроницаемым образом разделяет все пространство.

Попытались выяснить, что же будет происходить с наблюдателем, который падает на шварцшильдовскую сферу: ударится он обо что-то или нет? Оказалось, что с таким наблюдателем в этом смысле ничего особенного не произойдет, на своем пути он никакой сферы не почувствует и по своим часам за конечное время долетит до центра. Если его скорость была направлена строго по радиусу, он даже не будет описывать спирали.

С таким наблюдателем, правда, будут происходить более серьезные события, которые делают такое путешествие невозможным. Прежде всего гравитационные поля создают мощные приливные силы, которые будут вытягивать его в длину по радиусу и сжимать поперек. Но если бы он уцелел, то увидел бы странные вещи, посмотрев на мир, который он оставляет. По мере того как ускорение наблюдателя увеличивается, свет, который он раньше видел приходящим со всех сторон, начнет меркнуть, и светлым будет оставаться лишь конус за его спиной, в котором, как в оптическом приборе, будут собираться, изгибаясь, лучи света, несущие информацию об оставленном им мире. Этот конус будет все больше и больше сжиматься, пока не исчезнет совсем в тот момент, когда наблюдатель достигнет центра. У наблюдателя возникает «горизонт», который, постепенно сжимаясь, изолирует его от внешнего мира. В мире падающего наблюдателя все тела и свет падают

на центр, вокруг него не будет ничего летящего наружу. Далеко в своем небе он оставляет за горизонтом (шварцшильдовской сферой) свой старый мир.

Наблюдателя ждет и еще одна неприятность. Он лишен возможности послать о себе какую-либо весть обратно, так как ни один луч света не может выйти из-за шварцшильдовской сферы наружу. Таким образом, хотя в тех местах, где проходит шварцшильдовская сфера и нет никаких непроницаемых стенок, для падающего наблюдателя уход за эту сферу означает безвозвратное исчезновение. Никаким способом он не сможет больше сообщить о своем существовании. Геометрия в этом месте оказывается очень запутанной. Не все части пространства оказываются связанными друг с другом, и покоящийся наблюдатель должен знать, что за его бесконечностью лежит целый мир, который также бесконечен, но только с точки зрения падающего наблюдателя. Каждый наблюдатель видит свой собственный мир, но рассказать об этом друг другу они не могут.

В Солнечной системе ничего похожего не происходит. Гравитационный радиус Солнца очень мал по сравнению с его размерами, шварцшильдовская сфера находится глубоко в его недрах. Но все это приобретает актуальное значение для черных дыр, если они существуют.

### **ЕСТЬ ЛИ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ!**

Никто не знает, можно ли обнаружить черную дыру, если она расположена где-то в одиночестве. Но некоторые из них могут оказаться в составе двойных звезд и иметь светлого партнера. Надо только догадаться, чем такая звезда себя проявит. Я. Зельдович и О. Гусейнов сделали первую попытку найти двойную звезду с черной дырой, используя для этого два критерия. Во-первых, такая звезда должна быть источником рентгеновских лучей. Вещество, падающее на темную компоненту двойной звезды со светлой и из межзвездной сферы, будет проходить через мощное гравитационное поле. Торможение в этом поле породит рентгеновское излучение. Такой критерий хорош, но он не дает однозначного ответа: рентгеновские лучи возникают и от пульсара, и от белого карлика. Значит, во-

вторых, из всех двойных рентгеновских звезд надо отобрать те, у которых предполагаемая черная дыра имеет большую массу. Массу астрономы измерять умеют, хотя и не очень точно, так что программу можно было выполнить.

Оказалось, что обоим требованиям удовлетворить не легко. Массивных потухших звезд зарегистрировано не очень много, и длинный список двойных звезд — кандидатов в черные дыры — практически весь отпал.

Сейчас только об одной звезде можно говорить как о возможной черной дыре. Это двойная звезда Х1 в созвездии Лебедя. Как и у других двойных звезд, линии ее спектра колеблются, то укорачивая, то удлиняя свою длину волны, сообщая тем самым (через эффект Доплера), что светлая звезда обращается вокруг центра тяжести пары, периодически удаляясь или приближаясь к нам. Если бы вторая компонента звезды тоже светилась, наблюдатель видел бы раздвоение обеих линий, которые колебались бы с разностью фаз  $\pi/2$  (когда одна звезда приближается, другая удаляется). В спектре Х1 Лебедя видна лишь одна компонента. Массу темной компоненты астрономы оценивают по меньшей мере в 4 солнечных массы. Есть еще 2—3 двойных, у которых темная компонента имеет массу несколько больше солнечной, но оценки для них могут измениться.

Таким образом, сейчас только одна звезда в созвездии Лебедя может претендовать на то, что она — черная дыра. Но даже это не так уж мало. Если черные дыры существуют, то их должно быть великое множество разных масс и размеров, только обнаружить их очень трудно. И если Лебедь Х1 окажется на самом деле черной дырой, то нам действительно очень повезло, ведь совсем недавно казалось, что черную дыру обнаружить вообще нельзя.

### **МАССА ЧЕРНОЙ ДЫРЫ**

Из того, что было кратко рассказано о судьбе звезд, осталось неясным, почему все-таки в белом карлике и нейтронной звезде сжатие останавливается, а в более массивных звездах — нет; может быть, нейтроны, упаковавшись более плотно, смогут остановить сжатие? Если бы такой вопрос был задан физику прошлого века, он ничего не смог бы ответить. В арсе-

нале классической физики не существовало никаких сил, которые могли бы остановить сжатие. Сейчас мы это видим из того, что формулы для радиусов «сжатых» звезд содержат либо  $\hbar$ , либо  $c$ , либо обеих постоянных одновременно. Остановка сжатия белого карлика и нейтронной звезды — эффект квантовый и связан с принципом Паули, который запрещает двум электронам находиться в одном и том же состоянии. Этот принцип запрещает электронам переходить на более близкую к ядру оболочку, если эта оболочка уже занята. В звезде с раздавленными атомами электроны образуют подобие газа. Этот газ в отличие от нормального идеального газа почти не поддается сжатию — он, как говорится, вырожден. Согласно принципу Паули в объеме  $dv = dx dy dz$  могут находиться только два электрона, если компоненты их импульсов  $dp_x$ ,  $dp_y$ ,  $dp_z$  отличаются не менее чем на  $\frac{dx}{\hbar}$ ,  $\frac{dy}{\hbar}$  и  $\frac{dz}{\hbar}$  соответственно.

Рассмотрим, как это принято в механике, шестимерное фазовое пространство, т. е. пространство, точка в котором задается тремя координатами:  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и тремя компонентами импульса. В таком пространстве состояние каждой частицы, т. е. ее координаты и импульс, задаются точкой, а состояние всех частиц — множеством точек. В таких терминах принцип Паули требует, чтобы на каждые два электрона (два из-за двух возможных ориентаций спина) приходился объем, не меньший  $\hbar^3$ . То же следует и из принципа неопределенности:  $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar$ ,  $\Delta p_y \Delta y \geq \hbar$ ,  $\Delta p_z \Delta z \geq \hbar$ .

Из сказанного надо понять, что с уменьшением объема системы давление должно сильно расти, даже если температура сколь угодно мала. Так что даже холодный электронный газ обладает высоким давлением, в то время как для идеального классического газа  $PV = 0$  при  $T = 0$ . Это-то давление вырожденного газа и останавливает сжатие звезды.

Но у звезды остается все-таки «выход», если давление окажется слишком большим. При очень большом давлении электроны поглощаются нейтронами — происходит переход, обратный  $\beta$ -распаду, и электронный газ превратится в газ нейтронный, плотность которого может быть в миллиард раз больше плотности электронного газа. Радиус такой звезды может уменьшить-

ся в несколько тысяч раз. Опять наступит равновесие. Но не следует думать, что так будет продолжаться и дальше. В природе подобие всегда нарушалось. Если массу звезды продолжать увеличивать, то импульсы нейтронов возрастут настолько сильно, что скорости частиц окажутся близкими к скорости света. А раз возрастут скорости, возрастет и масса. Давление газа окажется такой же величины, что и плотность энергии. Это, в свою очередь, приведет к тому, что гравитационное поле звезды существенно возрастет\*, и вместо того чтобы компенсировать сжатие звезды, оно его ускорит. Это есть одно из проявлений нелинейного характера гравитационных уравнений, о котором мы как-то говорили: гравитационное поле усиливает само себя. Отсюда и неустойчивость.

Можно попытаться очень грубо оценить массу черной дыры. Начнем с того, что он должен быть равен ее гравитационному радиусу:

$$R = \frac{2\gamma M}{c^2} = R_{\text{гр с}} \frac{M}{M_{\text{с}}} .$$

Выразим массу через плотность:

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \varrho = M_{\text{с}} \left( \frac{R}{R_{\text{гр с}}} \right)^3 \frac{\varrho}{\varrho_{\text{с}}} .$$

Для простоты мы ввели в формулы гравитационный радиус Солнца, его радиус, массу и плотность.

Из этих двух формул получаем

$$M^2 = \frac{\varrho_{\text{с}}}{\varrho} \left( \frac{R_{\text{с}}}{R_{\text{гр с}}} \right)^3 M_{\text{с}}^2 .$$

Подставляя  $\varrho_{\text{с}} = 1,4$ ,  $R_{\text{гр с}} = 3$  км,  $R_{\text{с}} = 7 \cdot 10^5$  км и взяв в качестве плотности удвоенную плотность в ядре ( $\sim 10^{15}$  г/см<sup>3</sup>), получим  $M \sim 3M_{\text{с}}$ .

Это, конечно, очень грубая оценка, так как мы учли релятивистское возрастание массы просто удвоением плотности. Но и аккуратная оценка дает для максимальной массы нейтронной звезды величину порядка 2—5 масс Солнца (заметим, что такая оценка зависит

---

\* В газе, составленном из фотонов, давление равно  $\frac{1}{3}$  плотности энергии (это система, в которой реализуются предельные релятивистские скорости),

от модели звезды). Интересно, что масса Солнца лежит очень близко к опасной границе, но все же ниже ее. Солнце ждет конец белого карлика.

Оценкой, которую мы провели, надо пользоваться осторожно. Нельзя исключить ситуацию, когда массивная звезда при сжатии нагреется настолько, что не сумеет охладиться. Произойдет взрыв Новой. Какие будут после такого взрыва остатки и хватит ли их на черную дыру, предсказать, наверное, никто не возьмется.

### ВРАЩАЮЩИЕСЯ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Черная дыра, которую мы описали, для внешнего наблюдателя практически не существует, или, вернее, ее нельзя увидеть. Однако звезда окружена гравитационным полем, так как она имеет массу, а поле тяжести никаким образом нельзя заэкранировать. Значит, чтобы ни происходило внутри звезды, снаружи ее будет существовать статическое гравитационное поле, как у покоящейся частицы. У черной дыры может быть еще одна характеристика — момент количества движения (угловой момент)  $L$ . Этот момент удобно относить к массе звезды и вводить величину, имеющую размерность длины, —  $a$ :

$$a = \frac{L}{Mc}.$$

Теория показывает, что  $a$  не может быть больше гравитационного радиуса звезды, т. е. максимальный угловой момент, который может иметь звезда,  $L = MR_{\text{гр}}$ .

Вращающаяся черная дыра сильно отличается от покоящейся. У нее также есть свой горизонт, своя сфера, из которой ничего не может вырваться наружу, но такая сфера Шварцшильда меньше, чем сфера Шварцшильда невращающейся звезды. Ее радиус равен:

$$R = \frac{1}{2}R_{\text{гр}} + \sqrt{\frac{1}{4}R_{\text{гр}}^2 - a^2}.$$

Уменьшение радиуса происходит по той же причине, по какой уменьшается вес тела на земном экваторе.

Если тело падает на вращающуюся звезду, это падение происходит так же, как и в случае звезды покоящейся, но только до тех пор, пока тело не приблизится к экватору на расстояние гравитационного радиуса

(или меньшее расстояние на высоких широтах). С этого момента тело попадает в *эргосферу* черной дыры, и ничто на свете не может остановить теперь его падение. Оно начинает вращаться вместе с черной дырой и по спиральной орбите падает за горизонт.

Появление у черной дыры эргосферы делает всю систему интересней. Такая дыра может ускорять падающие тела. Если тело, попавшее в эргосферу, расколется на два куска, то один из них, провалившись в черную дыру, может отдать свою энергию второму осколку, который, как пущенный из пращи, вылетит наружу.

Такие черные дыры, если они есть, работая мусорным ящиком во Вселенной, возвращают часть энергии обратно в виде ускоренных частиц. Это свойство вращающихся черных дыр, может быть, указывает на их роль во Вселенной.

### **ДРУГИЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ**

Черные дыры как мумии угасших звезд представляют собой все же малые объекты. Даже если вещество, падающее в черные дыры, выделяет при падении энергию, вряд ли энергия эта существенна в общей эволюции Вселенной. Кажется естественным, что если такое явление, как падение звезды в собственные недра, реализуется в природе, то оно должно реализовываться в разных масштабах.

Можно представить себе, что из-за гравитационных сил сжимается масса вещества, в миллионы, а быть может, и в миллиарды раз превышающая массу Солнца. Такая черная «бездна» будет засасывать огромные массы вещества. Вблизи от такой бездны гравитационные поля будут настолько сильны и неоднородны, что будут разрывать звезды. Силы, которые на Земле вызывают сравнительно безобидные приливы и отливы, здесь будут совершать катастрофические разрушения. Такие катастрофы вряд ли могли бы остаться незамеченными, тем не менее их никто не видел. Но во Вселенной есть таинственные объекты, природу которых мы не можем понять. Это прежде всего квазары, квазизвездные объекты, размеры которых не превышают размеров большой звезды, а энергии они выделяют столько же, сколько Галактика. Никакие разумные объяснения источни-



ка энергии квазара не проходят. Может быть, здесь по-  
может черная бездна?

В центре Галактики, в ее ядре, происходят бурные процессы, которые скрыты от наблюдателя темными облаками. Может быть, и в ядре Галактики существуют и генерируют энергию черные бездны?

Картина, в которой Галактика получает энергию от гибнущих в черной бездне звезд, очень драматична. Но верна ли она, сказать нельзя. В этом вопросе скептицизм, как нигде, полезен. Наверное, такое описание событий слишком упрощает дело.

### ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

К двум характеристикам черных дыр — массе и моменту количества движения — можно добавить еще одну: электрический заряд. Нельзя не обратить внимания на то, что элементарные частицы также характеризуются аналогичными величинами: массой, спином и зарядом.

Из этого странного совпадения много раз пытались вывести какие-нибудь полезные следствия. В элементарных частицах, как и во Вселенной, есть свои тайны. Нельзя понять, почему не разлетаются на части заряженные частицы, — по всем расчетам они должны были бы разрываться из-за того, что разные части заряда отталкиваются друг от друга (но есть ли у элементарного заряда части?). Одно из возможных решений — гравитационные силы, которые на малых расстояниях вступают в игру. Наиболее простой была бы модель, в которой масса частицы была бы такой, чтобы притяжение внутри нее полностью компенсировало электрическое отталкивание. Для этого, очевидно, должно быть выполнено следующее соотношение:

$$\gamma m^2 = e^2.$$

Это значит, что масса такой частицы — ее назвали «фридмоном» —

$$m = \frac{e}{\sqrt{\gamma}} \approx 2 \cdot 10^{-6}.$$

Такая величина слишком велика для элементарной частицы. Но, может быть, где-то и она играет свою роль.

11 коп.

Индекс 70102

