23 коп.

Я убежден, что общая
теория относительности —
это прежде всего
физическая теория,
поэтому на протяжении
всей этой книги
я делаю упор
на ее физический смысл.
Моя исходная точка
зрения проста:
законы движения Ньютона
логически не полны,
и вытекающие
отсюда проблемы
шаг за шагом приводят нас
к тому сложному построению,
которое мы называем
общей теорией
относительности...
Таким образом,
общая теория относительности
не может рассматриваться
лишь как изящная теория,
не имеющая
прямого отношения
ко всей остальной физике.
Напротив, она необходима
и придает глубокий смысл
самым фундаментальным
и самым элементарным
представлениям,
на которые опирается
вся физика в целом.

Д. Сиама

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МИР»

THE PHYSICAL FOUNDATIONS OF GENERAL RELATIVITY

by D. W. Sciama

Doubleday & Company, Inc.
Garden City, New York 1969

Д. СИАМА

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Перевод с английского *В. А. Угарова*

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» МОСКВА 1971

УДК 530.1

Как движутся лучи света звезд вблизи Солнца? Что такое гравитационное красное смещение? Почему планеты отклоняются от путей, рассчитанных для них по теории тяготения Ньютона?

На все эти вопросы может дать ответ только общая теория относительности, созданная Альбертом Эйнштейном. В этой небольшой книжке известный английский физик Д. Сиама популярно изложил физические основы знаменитой теории Эйнштейна. Книгу с интересом прочтут все, кто увлекается наукой, в том числе школьники старших классов.

Редакция космических исследований, астрономии и геофизики

2-3-1; 2-6-1
107-71

ОТ ПЕРЕВОДЧИКА

Название предлагаемой вниманию читателей книги полностью раскрывает ее содержание. Это действительно *физические* основы теории относительности или — как еще ее иначе и, возможно, правильнее называют — теории тяготения Эйнштейна. Как отмечает автор, он сам отдает предпочтение физическому подходу к теории, а не математическому или философскому.

Со времени создания Эйнштейном теории относительности она стала своеобразным эталоном парадоксальности, а потому и непонятности. С шуткой Эйнштейна, что во всем мире его теорию понимает не больше десятка человек, знакомы почти все. И, возможно, именно этот ореол таинственности постоянно привлекал к его теории желающих что-нибудь узнать о ней: популярные книги по теории относительности пользуются неизменным спросом.

Однако доступное для неспециалистов изложение теории относительности, особенно общей, — задача не из легких: в теории используется сложный и громоздкий математический аппарат. Нельзя сказать, что на русском языке нет книг, посвященных относительно элементарному изложению теории. Но среди них книга, которую Вы держите в руках, занимает особое место: она гораздо доступнее, чем, скажем, университетский учебник, и в то же время гораздо богаче по содержанию, чем популярная статья.

Каков общий характер книги Дж. Сиамы, кому она будет полезна? В ней изложены принципы, положенные в основу теории тяготения Эйнштейна. Принципы эти не слишком просты и не слишком очевидны. Хотя их понимание не требует сверхъестественных способностей от читателя, оно все же предполагает известную подготовку. Разумеется, студент-физик (скажем, второго или третьего курса) или преподаватель физики в школе без труда разберется в том, что говорит автор. Под руководством учителя и с его разъяснениями эту книгу могут читать и увлекающиеся физикой школьники старших классов. Она не будет для них легкой, но труд, затраченный на ее чтение и размышление над затронутыми в ней вопросами, окупится сторицей. Читатель, который захочет подробнее ознакомиться с проблемами теории Эйнштейна, может обратиться к дополнительной литературе, перечень которой он найдет в конце книги.

Книга Сиамы входит в известную серию «Тем, кто изучает науки» (The Science Study Series). В числе книг этой серии, переведенных на русский язык, была и книга Г. Бонди «Относительность и здравый смысл» («Мир», 1967). Вместе они охватывают как специальную, так и общую теорию относительности, достаточно близки друг другу по характеру и манере изложения, и нередко Сиама отсылает читателя к книге Бонди. Оба автора — известные специалисты по общей теории относительности, типичные представители английской школы.

В своем изложении автор — в соответствии с точкой зрения английской школы — подчеркивает значение принципа Маха в теории тяготения. Следует указать, что, по мнению многих специалистов, принцип Маха не имеет отношения к теории тяготения Эйнштейна. Впрочем, обсуждение этого вопроса на том уровне, на котором написана книга, невозможно, а сам принцип Маха у Сиамы выглядит скорее как словесный орнамент.

Вопрос о природе тяготения интересует многих. «Загадка гравитации» — так названа одна из последних вышедших на русском языке книг, посвященных теории тяготения. В том, что загадка есть — нет никакого сомнения: вопрос состоит в том, разгадала ли ее современная наука. После Ньютона реальный шаг к разгадке сделан Эйнштейном. Понять в общих чертах смысл этого шага помогает предлагаемая книга, которую без колебаний можно рекомендовать всем интересующимся.

В. Угаров

ПРЕДИСЛОВИЕ

Общую теорию относительности можно излагать с различных точек зрения: физической, математической и, наконец, философской Я убежден, что общая теория относительности — это прежде всего физическая теория, поэтому на протяжении всей этой книги я делаю упор на ее физический смысл. Моя исходная точка зрения проста: законы движения Ньютона логически не полны, и вытекающие отсюда проблемы шаг за шагом приводят нас к тому сложному построению, которое мы называем общей теорией относительности. Каждый шаг логически оправдан — нигде нет произвола. Таким образом, общая теория относительности не может рассматриваться лишь как изящная теория, не имеющая прямого отношения ко всей остальной физике. Напротив, она необходима и придает глубокий смысл самым фундаментальным и самым элементарным представлениям, на которые опирается вся физика в целом. Моя книга основана на этом убеждении, она написана для тех, кого не удовлетворяет поверхностный анализ физического мира Когда я писал эту книгу, я еще и еще раз восхищался гением Эйнштейна, творение которого демонстрирует нам беспредельную силу человеческой мысли. Идеи Эйнштейна способны вдохновить тех, кто сегодня бьется над разрешением основных проблем современной науки.

Д. Сиама

Отделение прикладной математики
и теоретической физики,

Кембридж

Эта страница пуста

Made with ScanKromsator

Глава 1

ПРОБЛЕМА ИНЕРЦИИ

Введение

Мы настолько привыкли к инерции тел, что просто забываем, насколько загадочна она на самом деле. Ньютон отлично понимал, насколько удивительна инерция, и приложил немало усилий, чтобы понять ее. Он пришел к решению со словами: «Однако положение не совсем безнадежно». Предложенное им решение — вполне в духе его времени — сегодня уже неприемлемо. В этой книге мы займемся более приемлемой альтернативой, следуя идеям, которые развивались Альбертом Эйнштейном. Разработка этих идей завершилась созданием общей теории относительности — одного из самых красивых и глубоких творений человеческого разума и, пожалуй, логически самой полной и удовлетворительной из всех существующих теорий.

В этой главе мы разъясним, в чем состоит проблема, и расскажем, как ее разрешил Ньютон и почему его решение неудовлетворительно. В конце главы намечается путь к лучшему решению, которым мы будем следовать в дальнейшем.

Инерциальные системы отсчета

Поскольку инерция описывается ньютоновыми законами движения, мы начнём с того, что сформулируем эти законы, хотя читатель, возможно, уже знаком с ними.

Первый закон Ньютона. Тело, на которое не действуют силы, сохраняет состояние покоя или движется с постоянной скоростью.

Второй закон Ньютона. Ускорение тела пропорционально приложенной к нему силе.

Третий закон Ньютона. Действие и противодействие равны и противоположно направлены.

Один из вопросов, возникающих в связи с этими законами, состоит в следующем: каким способом можно установить, действует ли на тело сила, как не путем применения самих законов? Но тогда они в какой-то мере представляют собой тавтологию. Этот вопрос станет особенно важным позже. А пока будем считать, что мы можем определить, действует ли на тело сила, по присутствию источников этих сил, например по натянутому канату или магниту. Вопрос, который интересует нас сейчас, заключается в том, что два первых закона вообще выполняться не могут. Ведь чтобы измерить скорость тела, нам следует выбрать неподвижное тело отсчета. Но ничто не может помешать нам производить измерения скорости относительно различных тел отсчета, движущихся с ускорением по отношению друг к другу. Ясно, что не подверженное действию сил тело, о котором идет речь в первом законе, не может иметь постоянную скорость во всех этих случаях.

Таким образом, первые два закона Ньютона нужно уточнить, дополнив их следующим утверждением: существует система отсчета, по отношению к которой законы Ньютона справедливы. Если хотя бы одно такое тело отсчета будет обнаружено, то и любые другие тела отсчета, движущиеся относительно него равномерно и прямолинейно, будут в равной степени удовлетворять требованиям этих двух законов. Лишь тела отсчета, движущиеся с ускорением, будут портить всю картину. Привилегированный класс тел отсчета, для которого справедливы законы Ньютона, получил название *инерциальных систем отсчета*.

Теперь можно высказать следующее утверждение: *законы динамики во всех инерциальных системах отсчета одинаковы*. Из этой новой формулировки вытекает, что различные наблюдатели могут обнаружить одну и ту же группу явлений и описать их посредством одних и тех же законов. Переход от одного наблюдателя к другому не меняет физических законов. Это утверждение носит название *принципа относительности*. Указанный принцип включает в себя два момента: во-первых, явление (в данном случае — из области динамики) и, во-вторых, класс наблюдателей или систем отсчета (в рассматриваемом случае — инерциальных). Отсюда ясно, что принцип относительности можно обобщить в двух направлениях: расширить либо класс явлений, либо класс наблюдателей.

Обобщение на класс явлений было сделано в 1905 г. Эйнштейном. Он показал в созданной им специальной теории относительности, что все физические явления, а не только механические, подчиняются одним и тем же законам во всех инерциальных системах отсчета. Мы не станем касаться здесь этого вопроса — он рассмотрен в книге Г. Бонди «Относительность и здравый смысл» (изд-во «Мир», 1967).

Обобщение, расширяющее класс наблюдателей до всех наблюдателей, также было сделано Эйнштейном и привело к созданию общей теории относительности.

Чтобы уяснить себе значение принципа относительности, необходимо четко проводить различие между законами, управляющими физическими системами, и фактическими параметрами, описывающими ее состояние. Два инерциальных наблюдателя, движущихся друг относительно друга, получат различные численные значения скорости некоторого тела или частей физической системы. Однако они обнаружат, что остаются неизменными некоторые соотношения между различными параметрами системы, именно те соотношения, которые выражают законы, управляющие системой.

Это различие существенно для так называемого «принципа безразличия»*, который заключен в принципе относительности. Если физический закон удовлетворяет принципу относительности для определенного класса наблюдателей, то, убедившись в том, что этот закон справедлив и для нас, мы не можем сказать, каким именно представителем этого класса мы являемся. Говоря более конкретно, мы не в состоянии, к примеру, определить свою скорость**, если установили, что выполняются законы Ньютона; мы можем сказать только, что принадлежим к определенному классу инерциальных наблюдателей.

Можно иллюстрировать этот факт следующим образом. Предположим, что мы находимся в закрытом ящике, рав-

---

* В советской научной литературе такой термин не используется. Под принципом безразличия автор понимает независимость физических явлений от каких-либо условий, в частности от равномерного прямолинейного движения. — *Прим. перев.*

** Утверждение автора относится к тому, что принято называть абсолютной скоростью. Конечно, относительную скорость тел и систем отсчета определить всегда можно. В теории относительности абсолютной скорости тел нет места. — *Прим. перев.*

номерно движущемся по поверхности Земли. Тогда, какие бы физические эксперименты внутри ящика мы ни ставили, нам не удалось бы установить, движется он относительно Земли или нет*. Это обстоятельство несколько сбивает с толку, потому что из физических законов, найденных нами, нельзя определить скорость, а по конкретным значениям измеренных параметров можно. Например, в нашем движущемся ящике, помимо компоненты магнитного поля Земли, появляется еще и компонента электрического поля (см. книгу Г. Бонди «Относительность и здравый смысл»), по величине которой можно судить о скорости. Следовательно, необходимо твердо знать, что нужно считать законом и что — параметром, прежде чем использовать принцип относительности. Это различие крайне существенно для всего дальнейшего изложения.

Неинерциальные системы отсчета

Мы уже упомянули о том, что Эйнштейну удалось распространить принцип относительности на л ю б ы х наблюдателей. Чтобы разобраться в том, как это стало возможно, следует ясно представить себе точку зрения Ньютона, которой мы будем придерживаться в этой главе (и от которой отойдем лишь в самом конце). С этой точки зрения весьма существенно, что законы Ньютона справедливы только для инерциальных наблюдателей. Следовательно, измеряя степень отступления от законов Ньютона, каждый наблюдатель может определить свое ускорение относительно инерциальной системы.

Например, вращение Земли вокруг оси, проходящей через ее центр, можно установить из наблюдения, что она сплюснута у полюсов и расширена у экватора. Такое отклонение от сферической формы несовместимо с законами Ньютона для тела, находящегося в собственном поле тяготения, если само это тело выбрать за систему отсчета. Таким образом, налицо нарушение законов Ньютона, и поэтому Земля должна быть неинерциальной системой отсчета. Более того, можно определить параметры этой

---

* Приведенное утверждение справедливо с той точностью, с какой Земля может считаться инерциальной системой. Строго говоря, Земля инерциальной системой не является (см. ниже). — *Прим. перев.*

неинерциальной системы. Ось деформированной фигуры Земли совпадает с осью вращения, а величина отклонения от сферической формы позволяет определить угловую скорость ее вращения.

Ньютону удалось продемонстрировать вращение Земли еще одним способом. Бросая тела с большой высоты, он убедился, что они падают не по вертикали, а несколько отклоняются к востоку, причем тело имеет несколько бо́льшую горизонтальную скорость, чем линейная скорость

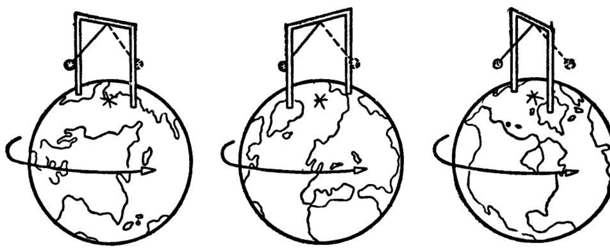


Рис. 1. Маятник Фуко, раскачивающийся на Северном полюсе. Плоскость качаний маятника фиксирована, тогда как Земля под ним поворачивается.

Земли в этом месте. Отсюда ясно, что движение тела относительно Земли не подчиняется второму закону Ньютона, а направление и величина отклонения от движения, предписываемого вторым законом Ньютона, позволяют указать ось вращения Земли и угловую скорость ее вращения. Маятник Фуко опирается именно на этот принцип. Маятник Фуко состоит из массивного груза, подвешенного на нити так, чтобы он мог свободно качаться в любой вертикальной плоскости. Для простоты рассмотрим такой маятник, раскачивающийся на одном из полюсов Земли, ибо на других широтах его движение будет выглядеть сложнее. Поскольку нить маятника закреплена на свободном подвесе, плоскость качаний маятника в абсолютном пространстве* остается неизменной, тогда как Земля под ним вращается (рис. 1). Наблюдателю на Земле будет казаться, что плоскость качаний совершает полный поворот за 24 ча-

* В данном случае под абсолютным пространством понимается система отсчета, в которой справедливы законы Ньютона. — *Прим. перев.*

Р и с. 2. Наблюдателю на Земле кажется, что плоскость качаний маятника поворачивается, как показано на рисунке

са (рис. 2). Этот поворот плоскости качаний маятника как раз и «выдает» вращение Земли.

Вращающееся тело представляет собой особенно интересный пример неинерциальной системы отсчета, потому что в отсутствие трения не нужно ни силы, ни пары сил, чтобы поддерживать вращение. Однако те же принципы справедливы и в том случае, когда неинерциальной системой отсчета служит тело, ускорение которого обусловлено внешними причинами. Например, кроме вращения вокруг собственной оси, Земля обращается вокруг Солнца под действием силы его притяжения с периодом в один год. С точки зрения земного наблюдателя вокруг Земли с тем же периодом обращается Солнце, но тогда нарушаются законы Ньютона. Ведь в таком случае Земля не испытывает ускорения, несмотря на то что на нее действует сила тяготения со стороны Солнца, тогда как Солнце испытывает ускорение, несмотря на то что на самом деле никакие силы на него не действуют*. В итоге мы снова оказываемся в неинерциальной системе отсчета. Итак, наш основной вывод состоит в следующем: наблюдая отступления от законов Ньютона, можно определить испытываемое нами *ускорение*, но отнюдь не *скорость*.

Сила инерции

На практике зачастую бывает удобно пользоваться неинерциальной системой отсчета, например вращающейся Землей. В таком случае законы Ньютона уже не справедливы, но самый простой способ сделать их справедливыми состоит в том, чтобы, помимо известных сил, дейст-

* Сила тяготения со стороны Земли не меняет наших рассуждений: Землю можно заменить любым телом со сколь угодно слабым тяготением.

вующих на тела, ввести некоторые добавочные «силы». Второй закон Ньютона можно записать в виде

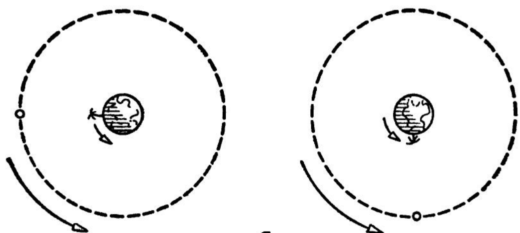
$$F = ma, \tag{1}$$

где внешняя сила F пропорциональна ускорению a; коэффициент пропорциональности называется *инертной массой*. Этот закон справедлив в любой инерциальной системе отсчета. Но представим себе, что в качестве тела отсчета мы выберем само тело, на которое действует сила. Соотношение (1) можно переписать так:

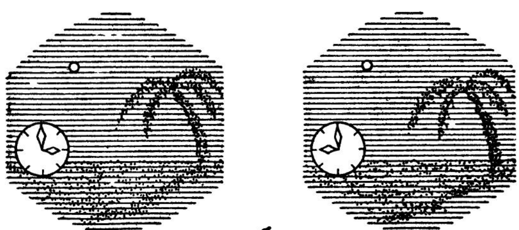
$$F - ma = 0. \tag{2}$$

С алгебраической точки зрения переход от формулы (1) к формуле (2) абсолютно тривиален. С физической точки зрения он имеет принципиальное значение, потому что соотношение (2) можно рассматривать в качестве второго закона Ньютона в неинерциальной системе отсчета. Но тогда мы должны принимать величину $-ma$ как одну из сил, действующих на тело. Конечно, эта сила $-ma$ отличается от силы F тем, что нельзя указать никакого физического источника этой силы — когда мы переходим к системе отсчета, движущейся ускоренно, не возникает ни натянутых канатов, ни магнитов. Чтобы подчеркнуть, что эти новые силы не являются такими же реальными, как и сила F, а возникают исключительно за счет выбора неинерциальной системы отсчета, их называют силами инерции, причем иногда даже фиктивными силами. В механике Ньютона введение сил инерции — просто формальный способ, позволяющий применять ньютоновы законы движения, когда они фактически не выполняются.

Наиболее известными примерами сил инерции являются силы, возникающие во вращающихся системах отсчета. Это прежде всего *центробежные силы*, направленные, как это ясно из их названия, от оси вращения. Необходимость их введения иллюстрируется рис. 3, на котором изображен искусственный спутник Земли, орбита которого проходит над земным экватором, а период обращения равен 24 часам. Это значит, что спутник все время расположен над одной и той же точкой земной поверхности. Относительно Земли спутник неподвижен, несмотря на то что на него действует сила земного притяжения, и земные наблюдатели видят его неподвижно висящим в небе без всякой видимой поддержки. Следовательно, у нас нет другого выхода, кроме введения невидимого «каната» или «магнита», поддерживающего спутник, — силы инерции, направленной от оси вращения Земли. Это и есть центробежная сила. Эта сила действует и на саму Землю, вызывая ее сжатие на полюсах и расширение на экваторе. Чтобы подсчитать ее величину, перепишем уравнение (1) для инерциаль-



а



б

Рис. 3. *а* — спутник, обращающийся в плоскости земного экватора с периодом 24 часа. *б* — этот спутник виден на экваторе неизменно висящим над головой без каких-либо видимых признаков поддерживающих его сил.

ной системы отсчета, в которой спутник обращается вокруг Земли с линейной скоростью v и угловой скоростью ω:

$$F = m\omega v. \qquad (3)$$

В неинерциальной системе отсчета, где спутник покоится, т. е. в системе, связанной с Землей, это уравнение запишется в виде

$$F - m\omega v = 0. \qquad (4)$$

Соответственно этому центробежная сила равна $m\omega v$ и направлена от оси вращения.

Кроме того, если тело движется относительно вращающейся системы отсчета, то нужно ввести еще одну силу инерции. На рис. 4, *а* изображено тело, движущееся по прямой с постоянной скоростью относительно инерциальной системы отсчета. На рис. 4, *б* показано, как выглядит движение этого тела в системе отсчета, вращающейся по ходу часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ω относительно оси, направленной перпендикулярно скорости v. В такой системе отсчета траектория тела

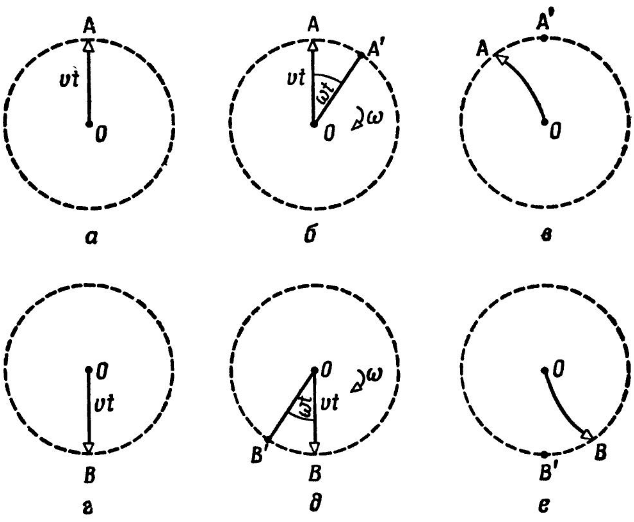


Рис. 4. Необходимость введения сил Кориолиса.
а — свободное тело движется по прямой с постоянной скоростью v. Картина, наблюдаемая в инерциальной системе отсчета. За время t тело пройдет расстояние vt и достигнет точки A. *б* — система отсчета вращается с угловой скоростью ω; за время t она повернется на угол ωt и точка A переместится в положение A'. *в* — по отношению к вращающейся системе отсчета точка A' занимает неизменное положение, и тело должно отклониться от прямой, чтобы попасть в A. Это отклонение от прямой и вынуждает нас ввести силу Кориолиса. *г, д, е* — если тело движется в противоположном направлении, то оно отклоняется от прямой в противоположную сторону.

будет отклоняться от прямой линии, хотя никакие силы на него не действуют (рис. 4, *в*). Если тело будет двигаться в противоположном направлении, то оно будет отклоняться в другую сторону (рис. 4, *г—е*). Таким образом, мы должны ввести еще одну силу инерции, действующую под прямым углом как к оси вращения, так и к направлению скорости тела. Эту силу инерции — так называемую *силу Кориолиса* — можно вычислить, и она оказывается равной

$$2m\omega v, \tag{5}$$

или в векторном обозначении, которое дает не только величину силы Кориолиса, но и ее направление*,

$$2m\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}.$$

Сила Кориолиса и есть та сила, которая действовала на тела, бросаемые Ньютоном в его экспериментах, и заставляла их отклоняться к востоку. И это та сила, которая

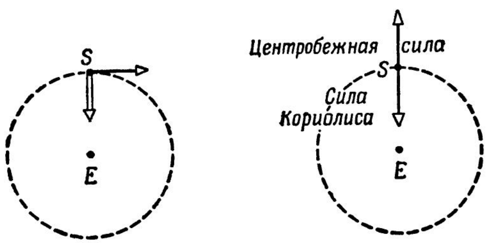


Рис. 5. Видимое суточное движение Солнца (S) вокруг Земли (E) обусловлено ускорением Солнца в направлении Земли. Сила Кориолиса, направленная в этом случае к Земле, в два раза больше, чем центробежная сила, направленная от Земли. Результирующая сила обеспечивает ускорение, направленное к Земле.

действует перпендикулярно плоскости качаний маятника Фуко и заставляет ее поворачиваться. Только при помощи силы Кориолиса можно объяснить видимое суточное движение Солнца относительно Земли (рис. 5), потому что такое движение предполагает, что ускорение Солнца направлено к Земле**. Но центробежная сила, возникаю-

* Векторное произведение двух векторов — это вектор, направленный перпендикулярно плоскости, в которой лежат перемножаемые векторы, а по величине равный произведению этих векторов на синус угла между ними. Сила Кориолиса отклоняет движущиеся тела к востоку в северном полушарии Земли и к западу — в южном. — *Прим. перев.*

** Здесь, конечно, предполагается, что масса Земли пренебрежимо мала по сравнению с массой Солнца. — *Прим. перев.*

щая в неинерциальной системе отсчета, связанной с Землей, направлена от Земли, причем величина ее, согласно формуле (4), равна $m\omega v$. Тут-то и приходит на помощь сила Кориолиса, которая действует на движущееся Солнце в направлении к Земле. Кроме того, поскольку в формулу (5) входит множитель 2, результирующая сила инерции, направленная к Земле, равна $m\omega v$, т. е. как раз той самой величине, чтобы Солнце испытывало ускорение к Земле, равное ωv.

Таким образом, мы можем оставить в силе ньютоновы законы движения и в неинерциальных системах отсчета, вводя дополнительные силы, источником которых не являются известные нам физические объекты.

Абсолютное пространство

Ньютона очень беспокоило то обстоятельство, что применимость полученных им законов движения столь ограничена. Почему не все системы отсчета равноправны для описания механических явлений? Возьмем конкретный случай. Пусть большое число сфер вращается относительно друг друга вокруг общей оси. На первый взгляд можно ожидать, что все они равноправны с точки зрения наблюдателя на каждой из сфер — все остальные просто вращаются с различной угловой скоростью. Однако все они имеют различную степень «сплюснутости на полюсах и расширения на экваторе», а одна из них, возможно, сохранила сферическую форму. Что же выделяет эту сферу среди остальных? По какому признаку природа выделяет те или иные тела?

Чтобы ответить на этот вопрос, Ньютон предположил, что пространство само по себе обладает физическими свойствами и поэтому ускорение относительно пространства имеет определенный физический смысл. С этой точки зрения инерциальные системы отсчета — это такие системы отсчета, которые движутся без ускорения относительно пространства. Сфера, форма которой не искажена, — это сфера, у которой нет *абсолютного* вращения, как говорил Ньютон. Поскольку мы подходим к воззрениям Ньютона критически, полезно процитировать подлинные слова Ньютона по этому поводу. Приводимый ниже отрывок из ньютоновых «Начал», опубликованных в 1687 г., очень важен с исторической точки зрения: именно отсюда возникло неразрешимое противоречие между относительным и абсолютным движением*.

«Проявления, которыми различаются абсолютное и относительное движение, состоят в силах стремления удалиться от оси вращательного движения, ибо в чисто относительном вращательном движении эти силы равны нулю, в истинном же и абсолютном они больше или меньше сообразно количеству движения. Если на длинной веревке подвесить сосуд и, вращая его, закрутить веревку, пока она не станет совсем жесткой, затем наполнить сосуд водой и, удержав сперва вместе с водою в покое, внезапным действием другой силы привести сосуд во вращение в сторону раскручивания веревки, то сосуд будет продолжать вращаться, причем это вращение будет поддерживаться достаточно долго раскручиванием веревки. Сперва поверхность воды будет оставаться плоской, как было до движения сосуда. Затем сосуд силою, постепенно действующей на воду, заставит и ее участвовать в своем вращении. По мере возрастания вращения вода будет постепенно отступать от середины сосуда и возвышаться по краям его, принимая впалую форму поверхности (я сам это пробовал делать); при усиливающемся движении она все более и более будет подниматься к краям, пока не станет обращаться в одинаковое время с сосудом и придет по отношению к сосуду в относительный покой. Этот подъем воды указывает на стремление ее частиц удалиться от оси вращения, и по этому стремлению обнаруживается и измеряется истинное и абсолютное вращательное движение воды, которое, как видно, во всем совершенно противоположно относительному движению. Вначале, когда относительное движение воды в сосуде было наибольшее, оно совершенно не вызывало стремления удалиться от оси — вода не стремилась к окружности и не повышалась у стенок сосуда, а ее поверхность оставалась плоской и истинное вращательное ее движение еще не начиналось. Затем, когда относи-

* Книга Ньютона «Philosophiae Naturalis Principia Mathematica» («Математические начала натуральной философии») была опубликована в 1687 г. на латыни. Она была переведена на большинство европейских языков. Перевод на русский язык был осуществлен А. Н. Крыловым в 1913 г. Он опубликован в «Собрании сочинений» А. Н. Крылова, Изд-во АН СССР, т. VII, 1936. Цитированный отрывок находится на стр. 34. — *Прим. перев.*

тельное движение уменьшилось, повышение воды у стенок сосуда обнаруживало ее стремление удалиться от оси и это стремление показывало постепенно возрастающее истинное вращательное движение воды, и когда оно стало наибольшим, то вода установилась в покое относительно сосуда. Таким образом, это стремление не зависит от движения воды относительно окружающего тела, следовательно, по таким движениям нельзя определить истинно вращательное движение тела. Истинное круговое движение какого-либо тела может быть лишь одно в полном соответствии с силою стремления его от оси, относительных же движений, в зависимости от того, к чему они относятся, тело может иметь бесчисленное множество; но, независимо от этих отношений, эти движения совершенно не сопровождаются истинными проявлениями, если только это тело не обладает, кроме этих относительных, и сказанным единственным истинным движением».

Можно коротко резюмировать ньютонову интерпретацию проделанного им эксперимента следующим образом: абсолютное вращение не имеет ничего общего с непосредственно наблюдаемым относительным вращением и тем не менее вполне возможно экспериментально определить величину абсолютного вращения тела. Все что нужно для этого сделать — это измерить кривизну поверхности воды, вращающейся вместе с телом; другими словами, мы должны установить, действуют или нет центробежные силы. Точно так же мы должны поискать силы Кориолиса. Таким образом, величину абсолютного вращения Земли, например, можно измерить по наблюдениям на ее поверхности; совсем не нужно обращаться к какому-то другому телу, относительно которого следовало бы определять вращение.

Однако представление Ньютона об абсолютном пространстве имеет несколько неудовлетворительных черт. Невозможно придумать абсолютное пространство, состоящее из особого рода «вещества», пронизывающего Вселенную. Дело в том, что если бы такое «вещество» существовало, то следовало бы ожидать, что имели бы смысл абсолютная скорость и абсолютное ускорение. Следовательно, принцип относительности не выполнялся бы и не существовало бы равноправия инерциальных наблюдателей. Как мы должны были бы объяснить тогда, что равномерное движение в абсолютном пространстве не вызывает никаких обнаружимых эффектов, в то время как ускорение их вызывает?

Причина, по которой Ньютон не мог дать ответа на этот вопрос, заключается в том, что введение абсолютного пространства фактически не содержит в себе возможности физического объяснения привилегированной роли инерциальных систем отсчета. Скорее, просто утверждается их существование. По той же причине понятие абсолютного пространства приводит к физическому парадоксу, заключающемуся в том, что оно может действовать на тела при помощи сил инерции, тогда как материальные тела не оказывают на него никакого влияния. Ведь, согласно представлениям Ньютона, свойства абсолютного пространства a priori заданы независимо от тех материальных тел, которые оно содержит.

Чтобы построить физически более обоснованную теорию инерции, мы можем развивать ее в любом из двух направлений. Если рассматривать пространство как источник сил инерции, то мы обязаны приписать ему физические свойства в том смысле, что оно не может быть абсолютным и раз навсегда заданным, а должно обладать изменяющимися свойствами из-за обратного воздействия на него со стороны тех тел, на которые оно действует. Эта довольно абстрактная точка зрения соответствует интерпретации физических взаимодействий на основе теории поля. Согласно этой теории, два электрических заряда взаимодействуют между собой не непосредственно, а через электрическое поле, создаваемое одним из них и действующее на другой. В этой картине подчеркивается локальность взаимодействия: электрические силы, действующие на заряд, определяются только электрическим полем в непосредственной близости от этого заряда. В свою очередь это поле зависит от поля в чуть более удаленных точках и т. д. вплоть до другого заряда, так что в конце концов оба заряда взаимодействуют. Но все же следует подчеркнуть, что каждый заряд прежде всего подвержен действию поля только в своей непосредственной окрестности. Аналогично можно считать, что и силы инерции, действующие на тело, зависят только от физических свойств пространства в непосредственной близости от него. Тогда связь этих свойств с наличием других тел — это уже отдельный вопрос.

Это и есть та точка зрения, на которую встал Эйнштейн. Однако, чтобы не нарушать исторической последовательности событий, а также для большей ясности изложения удобнее начать с альтернативной точки зрения. При таком подходе упор делается на прямое взаимодействие между телами. Для электрических зарядов типичным примером такого представления служит закон Кулона $F = e_1e_2/r^2$ (в отличие от представлений теории поля, воплощенных в уравнениях Максвелла). В случае сил инерции мы вынуждены сказать, что они вызываются отнюдь не пространством, а другими телами. Если это утверждение правильно, то силы инерции — отнюдь не фиктивные силы, а такие же физические силы, как и любые другие. Тогда ньютоновы законы движения были бы справедливы во всех системах отсчета и вопрос о привилегированном положении инерциальных систем отсчета отпал бы сам собой. В таком случае инерциальные системы отсчета — это такие системы, в которых силы инерции равны нулю, т. е. системы, определенным образом расположенные относительно тел, вызывающих эти силы. Но что это за тела? Вот этим-то вопросом мы и займемся в следующей главе.

Глава 2

ИСТОЧНИКИ СИЛ ИНЕРЦИИ

Введение

В этой главе мы попытаемся найти тела, которые могли бы быть источниками сил инерции. Но прежде нам следует вернуться к одному обстоятельству, от рассмотрения которого, как, вероятно, заметил читатель, мы уклонились в конце гл. 1. Допустив, что обычное вещество могло бы служить источником сил инерции, мы не обратили внимания на то, что уже Ньютон рассматривал эту возможность и отверг ее на основании опытных данных. Объясняя свой эксперимент с вращающимся ведром с водой, Ньютон подчеркнул, что форма водной поверхности не зависела от движения ведра относительно воды. Поэтому Ньютон заключил, что какие-либо иные тела не имеют никакого отношения к тому, возникают центробежные силы или нет. Следовательно, мы имеем дело с *абсолютным вращением*, т. е. с вращением относительно абсолютного пространства, на которое вещество не оказывает влияния.

Как же после всего этого мы собираемся искать влияние других тел? Ответ на этот вопрос был впервые дан лет двадцать спустя после опубликования ньютоновых «Начал» известным ирландским философом епископом Беркли, а еще полтора века спустя Эрнстом Махом *.

---

* Автор явно переоценивает научные заслуги Д. Беркли и Э. Маха. Во многом их критика абсолютного пространства и времени определялась не научными соображениями, а философской позицией. Критика Беркли направлена не столько против абсолютности, сколько против объективности пространства и времени Этот момент в критике Д Беркли и Э. Махом абсолютного пространства и времени глубоко раскрыт В. И. Лениным в книге «Материализм и эмпириокритицизм». В. И. Ленин убедительно показал субъективно-идеалистический характер философских взглядов Беркли и Маха, существенно повлиявших на постановку научных проблем и на подход к их решению

Вряд ли можно рассматривать работу Беркли «О движении», где анализируется эксперимент И. Ньютона с вращающимся ведром, или «Механику» Маха в качестве основных вех на пути становления и развития принципа относительности в физике. Конечно, эти работы, в особенности книга Маха, являющаяся физически более содер-

Взгляды Беркли на тяготение

Беркли указал, что этот вопрос носит количественный характер. Ведро может вносить неуловимо малый вклад в создание сил инерции, действующих на воду, поскольку, несмотря на близость к воде, ведро содержит очень незначительное количество вещества. Тогда мы должны поставить другой вопрос: нет ли какого-либо иного вещества, обладающего таким свойством, что поверхность воды искривляется только тогда, когда вода вращается относительно этого вещества? Ответ Беркли был недвусмысленным: этим веществом являются звезды.

Хорошо известно, что звезды совершают за 24 часа полный оборот относительно Земли. Однако с высокой степенью точности 24 часа — это как раз период вращения Земли вокруг своей оси, определяемый из локальных измерений центробежных или кориолисовых сил. Но это означает, что силы инерции появляются только тогда, когда имеет место вращение относительно звезд. Следовательно, эксперимент Ньютона вовсе не доказывает, что наличие сил инерции не зависит от вращения относительно других тел; по существу он доказывает нечто противоположное. По мнению Беркли, звезды вносят куда больший вклад в образование сил инерции, чем вещество ведра; их громадная масса делает несущественными те чудовищные расстояния, на которых они находятся.

Любопытно, что Беркли отвергал представления об абсолютном пространстве, поскольку оно ненаблюдаемо. Значит, если бы во Вселенной было всего одно тело, то говорить о его вращении было бы бессмысленно. Необходимо, чтобы существовали другие тела, т. е. звезды, относительно которых вращение можно измерить, и поэтому из физических соображений очевидно, что именно звезды должны быть ответственны за все физические явления, связанные с вращением. Вот несколько выдержек из сочинений Беркли.

«Если положение каждого места относительно, то и

жательной, могли оказать стимулирующее воздействие на отдельных ученых. Но это воздействие теперь, так сказать, «задним числом», преувеличивается: иногда сознательно, чтобы возвеличить роль идеалистической философии, иногда в силу одностороннего подхода к истории развития науки, когда забывается прежде всего тормозящая роль идеалистических концепций, в том числе Беркли и Маха, в процессе познания объективных закономерностей мира.— *Прим. ред.*

любое движение относительно, и, следовательно, движение не может быть определено без указания его направления, а это направление в свою очередь не может быть задано иначе, как относительно нас или какого-либо иного тела. Вверх, вниз, направо, налево — все направления и местоположения могут быть определены лишь в некоторой связи, причем совершенно необходимо допустить наличие тела, отличного от движущегося... таким образом, движение относительно по своей природе; оно не может быть определено иначе, как по отношению к некоторым телам; оно существует только в связи с этими телами. Выражаясь более общим образом, нельзя установить никакие связи, если нет предметов, с которыми нужно установить связь. ...

Если предположить, например, что все на свете исчезло, за исключением одного шара, совершенно невозможно представить себе какое-либо движение этого шара. ...

Представим себе, что существуют всего-навсего два шара и что, кроме них, ничего материального нет; тогда движение двух этих шаров вокруг их общего центра тяжести не может быть обнаружено. Но предположим, что вдруг было сотворено небо с неподвижными звездами, тогда мы будем в состоянии обнаружить движение шаров по их расположению относительно различных частей неба».

Принцип Маха

Мах подошел к проблеме инерции почти так же, как и Беркли. Заметим, что поднять вновь вопрос о силах инерции в такое время, когда авторитет Ньютона был почти непререкаем, было непростым делом. Критика законов Ньютона со стороны Маха была более глубокой, чем критика Беркли, но в отношении сил инерции точки зрения Маха и Беркли совпадали. Мах писал в 1872 г. в своей книге «История и корни принципа сохранения энергии»:

«Для меня существует только относительное движение... Когда тело вращается относительно неподвижных звезд, возникают центробежные силы; когда тело вращается относительно иных тел, а не относительно неподвижных звезд, никаких центробежных сил не обнаруживается. Я ничего не могу возразить против того, чтобы назвать первый случай вращением, если не забывать о том, что это не означает ничего иного, кроме вращения относительно неподвижных звезд».

Что касается того, что неподвижные звезды могут быть источниками сил инерции, то Мах высказывался куда яснее, чем Беркли. Он писал, в частности:

«Конечно, безразлично считать Землю вращающейся вокруг своей оси или покоящейся, а неподвижные звезды вращающимися вокруг нее. Геометрически оба эти случая совершенно одинаковы — относительное вращение Земли и неподвижных звезд относительно друг друга. Но если считать, что покоится Земля, а неподвижные звезды вращаются вокруг нее, то откуда бы взялось сжатие Земли, опыт Фуко и многое другое, по крайней мере если исходить из нашего обычного толкования закона инерции? Возникающую трудность можно обойти двумя путями. Либо всякое движение следует признать абсолютным, либо же принятые нами законы инерции сформулированы неправильно. Мне больше импонирует второй путь. Законы инерции должны быть сформулированы так, чтобы как из первого, так и из второго предположения вытекали одни и те же следствия. Чтобы это было так, необходимо учесть массы, распределенные во Вселенной».

Согласно Маху, инерциальные системы отсчета — это такие системы отсчета, которые не обладают ускорением относительно «неподвижных звезд», т. е. относительно некоторого подходящим образом определенного среднего распределения вещества во всей Вселенной. Более того, вещество обладает свойством инерции только потому, что во Вселенной имеется еще и другое вещество. Следуя Эйнштейну, мы будет называть это утверждение принципом Маха.

Почему именно ускорение?

Одним из преимуществ принципа Маха над ньютоновым представлением об абсолютном пространстве является то, что он дает возможность объяснить, почему именно ускорение, а не скорость следует определять локально. Допустим, что во всех направлениях имеется примерно одинаковое число звезд. Тогда если мы неподвижны относительно звезд, то силы инерции, которые они вызывают, взаимно компенсируются благодаря симметрии распределения масс. Но вот что мы должны объяснить: почему если звезды движутся мимо нас с постоянной скоростью, то результирующая сила инерции, создаваемая ими, равна нулю, а если они движутся относительно нас с ускорением, то результирующая сила уже больше не нуль? Безусловно, такое поведение сил инерции должно определяться законом, который описывает, как силы инерции зависят от движения их источника. Этот закон будет рассмотрен в следующей главе. Суть дела заключается в том, что мы имеем возможность объяснить совершенно различную динамическую роль скорости и ускорения, если сможем сопоставить их со свойствами взаимодействия. Если принять точку зрения Ньютона, то остается весьма загадочным, почему нельзя обнаружить скорость движения в абсолютном пространстве.

Это обстоятельство настолько существенно, что стоит задуматься о том, как выглядела бы физика, если бы существовало взаимодействие между локальным веществом и далекими звездами, зависящее от скорости. В этом случае при равномерном и прямолинейном движении звезд относительно нас возникли бы вполне наблюдаемые и измеримые явления. Любопытно отметить, что в 1963 г. было предположено существование взаимодействия именно такого типа. Хотя это предположение было очень скоро отвергнуто на основании экспериментальных данных, сам этот факт хорошо иллюстрирует, насколько важно, формулируя принцип относительности, проводить четкое различие между законами, управляющими системой, и фактическими значениями параметров, описывающих состояние системы. Об этом мы уже говорили в начале книги на стр. 11. Когда вещество распределено по всей Вселенной, одним из таких параметров будет относительная скорость локальной системы и удаленного вещества. Возможность измерения этой скорости путем наблюдений, производимых в локальной системе, будет вполне совместима с принципом специальной теории относительности.

Взаимодействие нового типа, о котором упоминалось выше, было предложено для объяснения наблюдаемого распада особого типа элементарных частиц, называемых K-мезонами, на две элементарные частицы, называемые π-мезонами. Этот распад как будто противоречил свойству симметрии элементарных частиц. Однако при взаимодействии указанного типа K-мезон должен быть связан с веществом всех звезд, причем так, что скорость его распада на два π-мезона зависела бы от его скорости относительно звезд. Эта теория отвергнута, поскольку такая зависимость не найдена экспериментально, но вместе с тем ясно, что, окажись теория правильной, постоянная скорость была бы вполне обнаружимой.

Ясно также, что если бы скорость распада зависела от скорости частицы и эта зависимость была бы обнаружена экспериментально до того, как такое необыкновенное взаимодействие было бы предложено, то физик—последователь Ньютона должен был бы предположить, что принцип относительности не справедлив вообще и что абсолютная скорость, как и абсолютное ускорение, имеет вполне определенный смысл. Но после предположения о существовании нового типа взаимодействия ему пришлось бы признать, что на K-мезон оказывают влияние далекие звезды. Таким образом, можно оставить в силе специальную теорию относительности и считать, что скорость K-мезона относительно звезд вполне поддается измерению, поскольку она представляет собой скорость по отношению ко всей системе звезд. Законы продолжают быть одинаковыми для всех инерциальных систем.

Точно так же принцип Маха показывает нам, что законы динамики могут оставаться справедливыми во всех системах отсчета, даже в неинерциальных. Силы инерции, которые появляются в неинерциальных системах отсчета, представляют собой физические эффекты, обусловленные далекими звездами; это заставляет нас определять ускорение относительно звезд — ускорение относительно всей системы. Другими словами, мы должны изменить свой взгляд на роль сил инерции. Вместо того чтобы приписать им роль нарушителей ньютоновых законов, мы вынуждены считать их средством определения ускорения относительно звезд. Силы инерции — теперь уже вовсе не составная часть закона, а просто некоторые значения параметров. Но чтобы оправдать такую точку зрения, нам необходима подробная теория инерциального взаимодействия между веществом, с которой мы познакомимся в следующей главе.

Глава 3

ЗАКОН ИНЕРЦИАЛЬНОЙ ИНДУКЦИИ

Введение

В этой главе мы попытаемся найти закон, определяющий силу инерции, с которой одно тело воздействует на другое. Как и в случае других типов сил (гравитационных, электромагнитных), эта сила будет зависеть от внутренних свойств тел, от их относительного движения и от расстояния между ними. Мы увидим, что у нас достаточно экспериментальных данных, чтобы уточнить все эти свойства инерциального взаимодействия между телами.

Зависимость от внутренних свойств вещества

Сначала поставим вопрос: какое свойство тела «отзывается» на действие силы инерции? Этим свойством (по определению) является инертная масса тела. Формально это утверждение содержится в выражениях (2), (3) и (5) гл. 1, из которых видно, что действующая на тело сила инерции пропорциональна его инертной массе. Это о п р е д е л е н и е, так как выражение для сил инерции непосредственно вытекает из второго закона Ньютона, определяющего свойство инерции вещества. Мы сталкиваемся с новой проблемой, когда спрашиваем: какое свойство тела определяет силу инерции, которую само это тело создает? Мы знаем, например, что сила со стороны электрического поля, действующего на тело, зависит от заряда этого тела. Но мы также знаем, что сила, с которой заряженное тело действует на другие заряженные тела, зависит от его заряда. Таким образом, заряд играет две роли — активную и пассивную. Основой для объяснения этого факта является третий закон Ньютона, утверждающий, что силы, с которыми два заряда действуют друг на друга, равны по величине и противоположны по направлению. Формула, определяющая эту силу

$$F \sim e_1 e_2,$$

симметрична относительно обоих зарядов.

По той же причине мы должны предположить, что инертная масса играет наряду с пассивной и активную роль, так что сила инерции между двумя телами с массами m_1 и m_2 должна подчиняться закону

$$F \sim m_1 m_2.$$

Таким образом, источником сил инерции должна быть инертная масса.

Зависимость от относительного движения

Здесь также полезно начать с рассмотрения аналогичной проблемы для сил, действующих между двумя зарядами. Если заряды перемещаются друг относительно друга, то сила взаимодействия между ними зависит довольно сложным образом от их относительного движения, причем возникающие эффекты зависят не только от скорости, но и от ускорения. Эффект, зависящий от ускорения, пропорционален величине ускорения α:

$$F \sim e_1 e_2 \alpha.$$

Мы акцентируем внимание на этом факте потому, что, как мы видели в предыдущей главе, силы инерции действуют на тело скорее всего тогда, когда звезды движутся ускоренно относительно этого тела. Таким образом, если инерциальное взаимодействие содержит какие-либо члены, зависящие только от положения или скорости этих звезд, то мы должны потребовать, чтобы эти члены давали результирующую, равную нулю, например вследствие симметричного распределения звезд вокруг нас. Это рассуждение не может дать ответа на вопрос, существуют ли такие члены вообще, но из него следует, что, как и в случае электрического взаимодействия, должен существовать эффект, зависящий от ускорения. Поэтому мы можем написать выражение для инерциального взаимодействия в виде

$$F \sim m_1 m_2 \alpha.$$

Зависимость от расстояния

Прибегнем в последний раз к аналогии с взаимодействием электрических зарядов. Сила взаимодействия между двумя неподвижными электрическими зарядами определяется законом Кулона: она обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Напротив, зависящий от ускорения эффект взаимодействия зарядов обратно пропорционален первой степени расстояния:

$$F \sim \frac{e_1 e_2}{r} \alpha.$$

Это различие существенно: именно изменение показателя степени r отражает тот факт, что ускоряющийся заряд испускает электромагнитное излучение, причем поток энергии излучения через поверхность сферы радиусом r оказывается не зависящим от r.

Следует ли принять такую же зависимость от расстояния для сил инерции? Другими словами, имеем ли мы право написать

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{r} \alpha? \qquad (6)$$

Числитель правой части этого соотношения легко обосновать, исходя непосредственно из определения силы инерции, но совсем не очевидны соображения, исходя из которых можно обосновать знаменатель. К счастью, все-таки есть один факт, который может нам помочь, — это вывод Ньютона из его эксперимента с вращающимся ведром воды. Когда тело (в данном случае ведро) ускоряется, сила инерции, которую оно вызывает, слишком мала, чтобы ее можно было обнаружить по ее действию на близлежащие тела. Поэтому нам нужно найти *дальнодействующую силу*, источником которой являются отдаленные тела с колоссальной массой, способной подавить влияние чудовищных расстояний.

Рассмотрим это предположение с количественной стороны. Оказывается, формулу (6) не так уж трудно обосновать. Первое, что нужно сделать, — найти численный верхний предел сил инерции, вызываемых близлежащим телом. Эксперимент Ньютона не очень чувствителен. Значительно более тонкий вариант этого эксперимента был поставлен в 1896 г. братьями Фридлендер. Они попытались измерить центробежные и кориолисовы силы внутри тяжелого быстро вращающегося махового колеса, увы, безуспешно. Еще более чувствительный способ — это наблюдение за видимым годичным движением Солнца вокруг Земли. Если бы Солнце служило основным источником инерции, то можно было бы ожидать, например, что маятник Фуко, который начал бы колебаться в плоскости, проходящей через Солнце, все время колебался бы в этой плоскости. В итоге относительно Земли плоскость качаний маятника поворачивалась бы с периодом в один год. Но ведь маятник Фуко ведет себя вовсе не так, и локальная невращающаяся система отсчета поворачивается вместе со звездами с точностью до нескольких угловых секунд в столетие (хотя для достижения такой точности требуется знать движение Луны куда точнее, чем движение самого маятника). Поэтому нужно подобрать закон силового взаимодействия так, чтобы вклад Солнца в полную силу инерции был менее

$$\frac{5}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 100}, \text{ или примерно } 4 \cdot 10^{-8},$$

от полной силы*.

Рассмотрим сначала закон, в который входит обратная пропорциональность квадрату расстояния, и найдем, что этот закон может быть почти наверняка отброшен из-за слишком малого радиуса действия сил. Закон обратной пропорциональности квадрату расстояния подошел бы, если бы звезды были распределены в пространстве равномерно; действительно, число звезд в сферическом слое, находящемся на расстоянии r, пропорционально r^2, а вклад каждой звезды в поле тяготения обратно пропорционален r^2. Значит, вклад в поле тяготения от всех слоев в точности одинаков. Если звезды распределены в значительной части пространства, то в создании поля участвует большое число слоев, и отдельные отклонения от строго равномерного распределения будут компенсироваться. Если за пределами радиуса R звезды отсутствуют, а толщина каждого слоя равна r_0, то число слоев будет равно R/r_0, а объем слоя на расстоянии r равен $4\pi r^2 r_0$. Суммар-

* Здесь автор принимает, что поворот системы отсчета за столетие ($10^5 \cdot 10^2$ *сек*) составляет около $5''$. — *Прим. перев.*

ное действие* всех звезд пропорционально тогда

$$4\pi r^2 r_0 n \frac{m}{r^2} \frac{R}{r_0}, \text{ или } 4\pi nmR,$$

где n — число звезд в единице объема и m — средняя масса звезды.

Сравним этот результат с воздействием Солнца. Полагая, что Солнце имеет массу средней звезды, получаем, что его притяжение должно быть пропорционально m/a^2, где a — расстояние от Земли до Солнца. Отношение этих двух величин равно

$$4\pi nRa^2, \tag{7}$$

и мы потребуем, чтобы оно было больше $1/(4\cdot10^{-8})$, т. е. $2{,}5\cdot10^7$.

Чтобы вычислить величину (7), нужно знать n и R. R — это радиус области, где сконцентрированы звезды. Нам следует исходить из того, что звезды, которые мы видим невооруженным глазом, принадлежат нашей Галактике, Млечному Пути, а наблюдаемая Вселенная представляет собой совокупность множества галактик. Поскольку вклад отдаленных слоев для нас существен, нам нельзя пренебрегать другими галактиками. Фактически в наших предыдущих рассуждениях мы можем заменить слово «звезда» словом «галактика», и это вполне законно, так как мы тем самым учитываем, что масса Солнца не столь велика, как массы галактик

Считается, что Вселенная в основном состоит из водорода. В некотором смысле более удобно рассматривать в качестве отдельного источника сил инерции не звезду или галактику, а атом водорода. Тогда следует учесть, что Солнце содержит огромное число атомов водорода. Для простоты предположим, что Солнце полностью состоит из водорода. Масса Солнца $2\cdot10^{33}$ *г*, а масса атома водорода $1{,}7\cdot10^{-24}$ *г*; значит, в Солнце заключено примерно 10^{57} атомов водорода. Поэтому действие всего вещества Вселенной превышает действие Солнца в

$$4\pi\cdot10^{-57} n_{\mathrm{H}}\, a^2 R \text{ раз}, \tag{8}$$

---

* Мы увидим в гл. 6, что просто суммировать вклады всех звезд, строго говоря, неверно; окончательная теория нелинейна. Однако для грубых оценок нам достаточно линейного закона.

где n_H — среднее число атомов водорода на единицу объема Вселенной и R — радиус Вселенной.

На первый взгляд эта формула выглядит довольно сомнительно, так как разумнее считать, что радиус Вселенной неограничен. Нас выручает то обстоятельство, что галактики непрерывно удаляются от нас, как об этом свидетельствует знаменитое «красное смещение» в их спектрах. Если это красное смещение интерпретировать как эффект Допплера, то можно показать, что скорость убегания галактики пропорциональна ее расстоянию от нас. Это соотношение называется *законом Хаббла* и обычно записывается в форме

$$v = \frac{r}{\tau},$$

где τ — постоянная Хаббла, которая, как показали наблюдения, равна примерно 10^{10} лет. На очень больших расстояниях, где v приближается к скорости света, из-за релятивистских эффектов вид закона Хаббла меняется. Но даже без подробного исследования этих эффектов мы могли бы предположить, что Вселенная имеет «эффективный» радиус $c\tau$, при котором закон Хаббла приводит к скорости разбегания, равной скорости света.

В наших расчетах влияния Вселенной мы пренебрегали разбеганием галактик. Предположим, что это разбегание уменьшает вклад удаленной галактики по тому же закону, по которому изменяется яркость галактики, т. е. обратно пропорционально квадрату расстояния. Это ослабление будет тем больше, чем быстрее удаляется от нас галактика, а значит, чем дальше от нас она находится. Это усложняет расчет полного вклада в тяготение от всех галактик. К счастью, для наших целей достаточно грубой оценки, и поэтому мы пренебрежем этим ослаблением и компенсируем его, принимая $c\tau$ за радиус Вселенной. Итак, примем $R \approx 10^{28}$ *см* и $a \approx 1{,}5 \cdot 10^{13}$ *см*. Тогда получим для отношения (8) $2{,}5 \cdot 10^{-2}\, n_H$ (n_H выражается в *атом/см*^{3}). Это отношение должно превышать $2{,}5 \cdot 10^7$. Поэтому мы требуем, чтобы n_H было больше 10^9 *атом/см*^{3}.

Разумно ли это требование? Если равномерно размазать все вещество галактик по Вселенной, то концентрация атомов водорода будет лежать между 10^{-7} и 10^{-6} *атом/см*^{3}. Хотя эта цифра очень неточна, мы видим, что эта величина значительно меньше той, которая нам требуется. Не исключено, что между галактиками содержится вещества больше, чем в самих галактиках (см. ниже), но никакая известная форма вещества с межгалактической концентрацией, эквивалентной 10^9 атомам водорода в 1 *см*^{3}, не могла бы существовать, ничем не обнаруживая себя при этом. Вместо того чтобы вводить неизвестные формы вещества, мы лучше откажемся от закона обратной пропорциональности квадрату расстояния для инерциального взаимодействия. Поскольку радиус действия сил, определяемых этим законом, слишком короток, компенсировать действие Солнца на локальные инерциальные системы отсчета можно, лишь предположив существование слишком больших количеств вещества вдали от нас. Поэтому займемся изучением сил с бо́льшим радиусом действия.

Закон обратной пропорциональности расстоянию

Если для простоты ограничиться целыми степенями r, то следующей зависимостью силы от расстояния, которую нам следует изучить, будет закон обратной пропорциональности первой степени расстояния. Такая зависимость была уже предложена нами выше по аналогии с электрическим взаимодействием. Теперь более существенным становится вклад удаленных слоев, ибо с увеличением расстояния число источников возрастает быстрее, чем уменьшаются силы инерции от каждого источника. Поэтому мы не сильно занизим общее влияние Вселенной, если предположим, что все атомы водорода находятся от нас на расстоянии $c\tau$. Полное число атомов равно $(4\pi/3)(c\tau)^3 n_H$, и, согласно закону обратной пропорциональной зависимости, вызываемый ими эффект* пропорционален

$$\frac{4\pi}{3}(c\tau)^2 n_H.$$

Влияние Солнца пропорционально $10^{57}/a$.

Отношение этих двух эффектов равно

$$\frac{4\pi}{3}\cdot 10^{-57} n_H (c\tau)^2 a, \text{ или } 6\cdot 10^{12} n_H.$$

Но эта величина должна быть больше $2{,}5\cdot 10^7$, поэтому мы получаем для n_H следующее неравенство:

---

* См. примечание на стр. 34.

$$n_{\text{H}} > 4 \cdot 10^{-6} \textit{ атом/см}^3 \text{ (или } 7 \cdot 10^{-30} \textit{ г/см}^3\text{)}.$$

Как мы и ожидали, теперь для подавления влияния Солнца нужно значительно меньше вещества во Вселенной. Полученный нами нижний предел очень близок к оценкам количества вещества в галактиках. И наш расчет и соответствующие наблюдения, конечно, являются приближенными, поэтому трудно сказать, насколько значительны имеющиеся между ними расхождения. Однако интересно рассмотреть условие, налагаемое этой теорией и заключающееся в том, что между галактиками вещества должно быть значительно больше, чем в самих галактиках. Предполагая для простоты, что это вещество находится в форме межгалактического газа, мы можем задать вопрос: какова же максимальная плотность этого газа, который до сих пор так и не удалось обнаружить?

Межгалактический газ

Если бы этот газ состоял из нейтральных атомов водорода, то он проявлял бы себя, поглощая излучение, испускаемое удаленными галактиками. Это поглощение было бы очень заметно на двух длинах волн. Одна из них лежит в радиодиапазоне—линия $\lambda 21$ *см*. Однако на этой длине волны поглощение не было зарегистрировано в пределах чувствительности наблюдений. Отсюда следует, что верхний предел концентрации межгалактического атомарного водорода составляет около $3 \cdot 10^{-6}$ *атом/см*^{3}, т. е. очень близок к нижнему пределу $4 \cdot 10^{-6}$ *атом/см*^{3}, который мы определили выше.

Недавно были произведены значительно более точные измерения в другой области спектра — в далекой ультрафиолетовой области на длине волны 1216 Å. Вообще говоря, поглощение в этой линии регистрировать посредством наземных наблюдений невозможно, так как атмосфера пропускает лишь незначительную часть ультрафиолетовых лучей. Однако если источник ультрафиолетового излучения имеет достаточно большое красное смещение, то это излучение будет сдвинуто в видимую область спектра, и если поглощающий газ также имеет большое красное смещение, то найдется длина волны, на которой будет происходить поглощение (рис. 6). Такие источники теперь известны — это знаменитые квазизвездные объекты, или квазары, — но никакого поглощения и у них не было зарегистрировано. Этот результат накладывает значительно более жесткий предел на концентрацию межгалактического атомарного водорода, чем отсутствие поглощения на волне 21 *см*, так как атомарный водород поглощает на $\lambda 1216\text{Å}$ значительно сильнее, чем на $\lambda 21$ *см*. Итак, верхний предел равен приблизительно 10^{-12} *атом/см*^{3}, т. е. значительно меньше найденного нами ранее значения 10^{-5} *атом/см*^{3}.

Поэтому мы вынуждены предположить, что если плотность межгалактического водорода $\sim 10^{-5}$ *атом/см*^{3}, то он

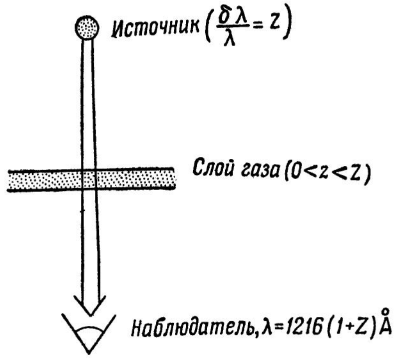


Рис. 6. Межгалактическое поглощение излучения с длиной волны 1216 Å проявляется в виде полосы поглощения в спектре источника с красным смещением $\delta\lambda/\lambda = Z$; эта полоса расположена в интервале длин волн от 1216 до $1216\,(1+Z)$ Å. Красное смещение в слое обозначено через z $(0 < z < Z)$.

должен быть ионизирован или же распределен крайне неравномерно, скажем находиться главным образом в скоплениях галактик. Если же водород распределен достаточно равномерно и, следовательно, ионизирован, то приходится предположить, что в любой момент времени остаются нейтральными не более одной частицы из 10^7.

Но как может поддерживаться такая высокая степень ионизации? Наиболее разумный ответ на этот вопрос заключается в том, что газ имеет высокую кинетическую температуру и столкновения между частицами достаточно часты, чтобы сохранить газ в ионизированном состоянии. Для газа с концентрацией 10^{-5} *атом/см*^{3} требуется как минимум температура около $7 \cdot 10^{5}$° К, причем для более высоких концентраций требуются еще более высокие температуры. Однако температура газа не может быть значительно выше указанной величины, иначе горячий газ испускал бы мощный поток рентгеновских лучей. Правда, рентгеновские лучи поглощались бы земной атмосферой, но их зарегистрировали бы спутники, летающие над атмосферой. Наблюдаемый нижний уровень космического рентгеновского фона определяет верхний предел температуры межгалактического газа примерно 10^{6}° К, если его концентрация 10^{-5} *атом/см*^{3}. Будущие наблюдения относительно более мягких рентгеновских лучей либо зарегистрируют излучение этого газа, либо передвинут верхний предел его температуры до $3 \cdot 10^{5}$° К. По-видимому, это максимальное значение, которое можно обнаружить описанным методом, ибо более мягкие рентгеновские лучи поглощались бы межзвездным газом в нашей Галактике*. Но этого достаточно, чтобы проверить, действительно ли существует однородный межгалактический газ с концентрацией $n \sim 10^{-5}$ *атом/см*^{3}.

Таким образом, в настоящее время мы можем допустить, что существует межгалактический газ с такой концентрацией, если его температура примерно 10^{6}° К. Разумно ли требовать такую высокую температуру межгалактического газа? Это зависит от потока тепла через газ, о чем нам мало что известно. Но поток космических лучей в межгалактическом пространстве, который составляет только 1/1000 этого потока в нашей Галактике, по-видимому, нагревал бы газ до требуемой температуры 10^{6}° К. Истинный поток космических лучей в межгалактическом пространстве неизвестен, но грубые оценки «просачивания» космических лучей из других галактик давали величину около 1/1000 еще до того, как встал вопрос о нагревании межгалактического газа.

Если бы со временем наблюдения показали, что средняя концентрация межгалактического газа значительно меньше, чем наш нижний предел $4 \cdot 10^{-6}$ *атом/см*^{3}, то нам вовсе не обязательно было бы отказываться от закона инерциального взаимодействия $1/r$. Во-первых, мы могли предположить, что межгалактический газ распределен не-

---

* По результатам предварительного исследования спектра мягких рентгеновских лучей концентрация межгалактического газа $\sim 10^{-5}$ *атом/см*^{3}, а температура $\sim 5 \cdot 10^{5}$ ° К.

равномерно, скорее всего сконцентрирован в скоплениях галактик. В этом случае его трудно было бы обнаружить, хотя астрономы располагают первоклассными приборами. Во-вторых, возможно, что нелинейные члены, которыми мы пренебрегли, допускают для Вселенной более низкую концентрацию газа — около 10^{-6} *атом/см*^{3}, которая соответствует концентрации равномерно «размазанных» по всей Вселенной галактик.

Читатель может теперь спросить: не лучше ли было бы выбрать еще более дальнодействующую силу, чем сила, обратно пропорциональная первой степени r? Тогда не возникало бы никакой проблемы, связанной с недостатком вещества. Трудность состоит в том, что если предположить, что Вселенная бесконечна, а конечная величина ее радиуса, которую мы приняли, выводится из «обрезания», обусловленного красным смещением, то при силе, слишком незначительно убывающей с расстоянием, «обрезание» уменьшается и полный эффект от всего вещества во Вселенной может стать бесконечным. Поскольку межгалактический газ с требуемой конечной концентрацией соответствует общим представлениям современной астрофизики и поскольку влияние нелинейных членов выяснено отнюдь не до конца, мы предпочитаем на сегодняшний день остановиться на законе $1/r$.

Выводы

Итак, закон, определяющий силу инерции, следует записать в форме

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{r} \alpha,$$

если средняя плотность вещества во Вселенной $\sim 7 \cdot 10^{-30}$ *г/см*^{3}.

Глава 4

ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

Введение

До сих пор в наших рассуждениях было одно существенное ограничение: мы считали, что инерция вещества обнаруживает только ту часть дальнодействующего инерциального взаимодействия, которая зависит от ускорения. По аналогии с электрическим взаимодействием мы могли бы ожидать, что наряду с взаимодействием

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{r} a$$

существует также статическое взаимодействие

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{r^2} \tag{9}$$

и, кроме того, может существовать взаимодействие, зависящее от скорости. В этой главе мы займемся следствиями, возникающими из предположения о том, что статическое взаимодействие действительно существует. Как читатель мог уже догадаться из вида формулы (9), такое статическое взаимодействие вполне естественно отождествить с тяготением. Это отождествление было сделано Эйнштейном в 1907 г., и теперь оно называется *принципом эквивалентности* (сил инерции и сил тяготения).

Обнаружение статического взаимодействия

Давайте на некоторое время забудем принцип эквивалентности и зададим простой вопрос: можно ли обнаружить гипотетическое статическое взаимодействие (9) опытным путем? Поскольку это взаимодействие характеризуется силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния, наши предыдущие рассуждения показывают, что для нас

Солнце является более существенным источником тяготения, чем вся наша Галактика или даже чем все другие галактики с межгалактическим веществом вместе взятые (хотя в любом случае можно ожидать, что действие большинства этих внегалактических источников вследствие симметрии будет взаимно компенсироваться). Аналогичные аргументы показывают, что главный вклад в силу, действующую в земной лаборатории, давала бы сама Земля ($m_З / r^2_З = 1{,}5 \cdot 10^{10}$ *г/см*^{2}), а не Солнце ($m_С / a^2 = 9 \cdot 10^6$ *г/см*^{2}). Поэтому наша задача сводится к тому, чтобы выяснить: достаточна ли статическая сила Земли (9), чтобы ее можно было экспериментально обнаружить?

Мы знаем массу Земли и расстояние до ее центра, но не можем вычислить эту силу до тех пор, пока не известен коэффициент пропорциональности в формуле (9). Чтобы разобраться в этой проблеме, полезно вернуться опять к случаю электрического взаимодействия. Здесь статическое взаимодействие выражается законом Кулона

$$F = \frac{k e_1 e_2}{r^2},$$

где k — «диэлектрическая константа вакуума». Сила, зависящая от ускорения, имеет вид

$$F = \frac{k e_1 e_2}{c^2 r} \Theta,$$

где c — скорость света в вакууме, а Θ определяет зависимость этой силы от угла между направлением на источник и направлением его ускорения (рис. 7).

Разумно предположить, что инерциальное взаимодействие описывается аналогичным выражением. Тогда для статической части этого взаимодействия мы напишем

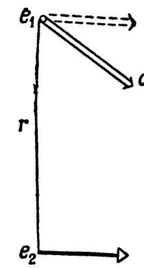
$$F = \frac{K m_1 m_2}{r^2},$$

а для части, зависящей от ускорения,

$$F = \frac{K m_1 m_2}{c^2 r} \alpha \Phi, \tag{10}$$

где Φ определяет угловую зависимость. Множитель c^2 нужен нам по соображениям размерности, как и в случае электрического взаимодействия, но угловая зависи-

Р и с. 7. На пробный заряд e_2 со стороны ускоряемого заряда e_1 действует, помимо кулоновской, дополнительная сила. Эта сила а) лежит в плоскости, проходящей через вектор ускорения и пробный заряд, б) перпендикулярна линии, соединяющей эти заряды, и в) пропорциональна проекции вектора ускорения на направление, перпендикулярное линии, соединяющей заряды.



мость Ф может быть и отличной от Θ. В этой главе мы будем довольствоваться грубой оценкой, поэтому временно положим $\Phi = 1$.

Теперь мы можем оценить величину K из условия, что полная сила инерции, действующая на неподвижное тело с инертной массой m_2, равна $m_2\alpha$, где α — ускорение галактик относительно рассматриваемого тела. Мы должны поэтому добавить* еще силы F, определяемые по формуле (10), для всех источников во Вселенной. Мы уже провели такое суммирование ранее и знаем, что можно получить несколько заниженную оценку, если исходить из предположения, что все «вещество» сосредоточено внутри сферы радиусом R с равномерной плотностью ρ. Полная масса будет равна $(4\pi/3)\, R^3\rho$, и создаваемая ею полная сила, зависящая от ускорения, равна примерно

$$\frac{K}{c^2}\,\frac{(4\pi/3)\, R^3\rho\, m_2\alpha}{R}.$$

Множитель Ф мы положили равным единице. Предполагая, что эта сила равна $m_2\alpha$, получаем соотношение

$$\frac{K}{c^2}\,\frac{4\pi}{3}\,\rho R^2 \sim 1.$$

Таким образом, постоянная K определяется формулой

$$K \sim \frac{3}{4\pi}\,\frac{c^2}{\rho R^2}.$$

Значение c мы знаем очень точно, R известно достаточно хорошо, но до сих пор для ρ мы получили из линейной теории лишь неравенство

---

* См. примечание на стр. 34.

$$\rho \geqslant 10^{-29}\ г/см^3.$$

Этот нижний предел для ρ, если использовать граничное значение, требует, чтобы в межгалактическом пространстве было заключено примерно в 100 раз больше вещества, чем в галактиках, поэтому будем принимать это значение ρ до тех пор, пока мы используем линейное приближение.

Таким образом,

$$K \sim \frac{3}{4\pi}\,\frac{(3\cdot 10^{10})^2}{10^{-29}\cdot 10^{56}}\ см^3/г\cdot сек^2 \approx 2\cdot 10^{-7}\ см^3/г\cdot сек^2.$$

Полученное значение K, по-видимому, несколько завышено. Теперь можно вычислить статическую силу, обусловленную земным тяготением. Она равна

$$\frac{K m_З\, m_2}{r_З^2}.$$

По второму закону Ньютона эта сила вызывает ускорение

$$K\frac{m_З}{r_З^2},$$

численное значение которого

$$\sim 2\cdot 10^{-7}\ см^3/г\cdot сек^2\cdot 1{,}5\cdot 10^{10}\ г/см^2 = 3\cdot 10^3\ см/сек^2.$$

Это значение, должно быть, несколько завышено.

Вычисленное ускорение не только достаточно велико, чтобы быть заметным, — оно уже давно измерено и известно под другим названием — *тяготение*. Таким образом, мы пришли к следующему утверждению: *тяготение является статической частью инерциального взаимодействия*. Если это отождествление правильно, то K — это просто гравитационная постоянная Ньютона, более точное значение которой, как известно, равно

$$K = G = 6{,}7\cdot 10^{-8}\ см^3/г\cdot сек^2.$$

Таким образом, наша (завышенная) оценка $2\cdot 10^{-7}\ см^3/г\cdot сек^2$ достаточно точна, а это значит, что мы брали в линейном приближении вполне разумное значение плотности ρ. Точное значение ρ для полной нелинейной теории пока неизвестно.

Принцип эквивалентности

Эйнштейн первым высказал предположение, что существует тесная связь между силами инерции и силами тяготения. Однако он пришел к этому предположению совсем не тем путем, который описан здесь. В то время, когда Эйнштейн работал над этой проблемой (1905—1915 гг.), мало что было известно о крупномасштабной структуре Вселенной. Тогда было широко распространено мнение, что Млечный Путь заключает в себе всю Вселенную, а у астрономов были только очень смутные представления о полном количестве вещества во Вселенной.

Эйнштейна особенно поразило то, что силы тяготения пропорциональны инертной массе тела, на которое они действуют, причем разным телам эти силы сообщают одинаковое ускорение. Это замечательное свойство сил тяготения было открыто еще Галилеем, правда, по мнению современных историков, отнюдь не в результате изучения падения различных тел с наклонной Пизанской башни. Но так или иначе Галилей, по-видимому, сознавал, что ускорение, обусловленное силой тяжести, одно и то же для всех тел независимо от их массы и строения. Этот факт озадачивал Ньютона, который провел скрупулезные эксперименты, чтобы проверить, с какой точностью этот вывод является правильным. Впоследствии были поставлены еще более точные эксперименты такими физиками, как Бессель и Этвеш, а в наше время — Дикке с сотрудниками в Принстоне, которые нашли, что тела из различных веществ имеют одинаковое ускорение с точностью до 10^{-11}.

Это свойство тяготения находится в поразительном контрасте с действием электрических и магнитных сил, которые не вызывают одинакового ускорения всех тел. Кроме того, некоторые тела электрически нейтральны или не обладают магнитными свойствами. Это различие между тяготением и электромагнитными силами, конечно, было хорошо известно всем физикам со времен Галилея, но никто не сознавал всей его важности вплоть до 1907 г.

Именно в этом году у Эйнштейна возникла мысль, что существует другой тип сил, которые, подобно силам тяготения, пропорциональны массе тела, на которое она действует. Эйнштейн имел в виду силы инерции, описанные нами в гл. 1. Как было указано там, величина силы инерции, действующей на тело, пропорциональна массе этого тела.

В этом отношении силы инерции подобны силам тяготения и отличаются от электрических и магнитных сил.

Эйнштейн понял, что это сходство сил тяготения и инерции делает невозможным их разделение. Поясним, что это значит, напомнив, чем отличаются силы тяготения от электромагнитных сил. Пусть имеется поле сил, и требуется выяснить, какую часть этого поля составляет поле тяготения и какую — электромагнитное поле. Все, что нам надо сделать, это найти ускорения в этом поле одного нейтрального (незаряженного) тела и одного заряженного. Ускорение нейтрального тела даст нам величину гравитационной части поля. Это поле вызывает одинаковое ускорение как заряженного, так и незаряженного тела. Разница между ускорениями этих тел определяет величину электрической силы.

Предположим, что мы используем этот же самый метод, чтобы отделить силу тяготения от силы инерции. Поскольку обе эти силы пропорциональны массе тела, на которое они действуют, мы оказываемся бессильными произвести требуемое разделение. Какое бы тело мы ни использовали для измерения силы, результирующее ускорение будет всегда одним и тем же. Мы можем определить полную величину этой силы, но не можем сказать, каков вклад сил тяготения и инерции порознь.

Эйнштейн любил иллюстрировать эту ситуацию следующим примером. Пусть наблюдатель помещен в ящик, находящийся в пространстве, свободном от сил тяготения. Предположим, что за веревку, привязанную к ящику, внезапно дергают, так что ящик ускоряется относительно инерциальной системы отсчета (рис. 8, *а*). Наблюдатель в ящике может считать себя покоящимся в течение эксперимента, но тогда ящик представляет собой уже неинерциальную систему отсчета. Следовательно, на ящик будет действовать сила инерции. Для наблюдателя наличие силы инерции будет очевидным: если он отпустит предмет, то этот предмет будет ускоряться (рис. 8, *б*). Однако самое важное то, что все предметы будут двигаться с одинаковым ускорением, потому что это ускорение равно и противоположно по направлению его собственному ускорению относительно инерциальной системы. В точности то же самое наблюдалось бы, если бы на ящик стала действовать сила тяготения (рис. 8, *в*). Это означает, что наблюдатель не может сказать, какой из этих двух случаев имеет место.

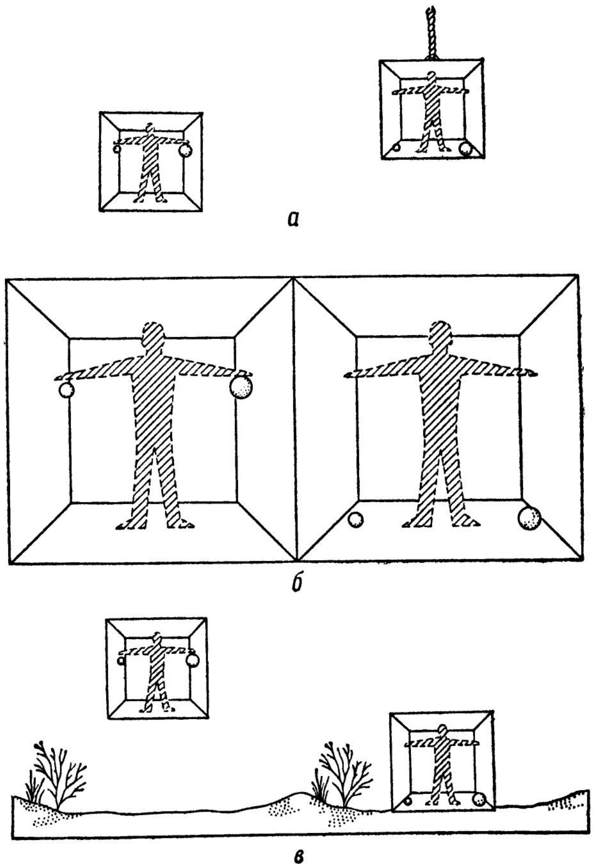


Рис. 8. *а* — наблюдатель в ящике находится в пространстве, свободном от сил тяготения. Затем тянут за веревку, привязанную к ящику, и ящик начинает двигаться с ускорением. Наблюдатель движется вместе с ящиком, но шары, находящиеся первоначально около его рук, остаются на месте. *б* — та же самая ситуация, как она представляется наблюдателю. Он испытывает силу инерции, которая действует на него сверху вниз. Эта сила действует и на шары, и они движутся с одинаковым ускорением, несмотря на то что имеют разные массы. Это ускорение равно и противоположно ускорению человека в ситуации (*а*). *в* — другая физическая ситуация, которая выглядит для наблюдателя в точности так же, как и предыдущая. Сначала он падает по направлению к притягивающему телу, затем в момент удара о поверхность резко останавливается, тогда как шары продолжают падать с тем же самым ускорением.

Приведенное выше рассуждение целиком опирается на тождественность реакции массивных тел на действие сил тяготения. Наблюдатель мог бы разобраться в ситуации, если бы существовал какой-либо критерий, в силу которого можно было бы отличить силы тяготения от сил инерции по другим признакам, например по поведению света или по какому-нибудь тонкому атомному эффекту на микроскопическом уровне. Заслуга Эйнштейна состоит в том, что он возвел эксперимент Галилея до принципа — знаменитого *принципа эквивалентности*. Согласно этому принципу, не существует никакого критерия, посредством которого можно было бы отделить силы инерции от сил тяготения.

Этот подход отличается от предыдущего тем, что он не глобальный, а локальный. Другими словами, мы имеем здесь дело с прямым действием сил тяготения на тела, а не с источниками этих сил. Согласно Эйнштейну, мы не можем локальным методом различить статическую силу тяготения и определяемую ускорением силу инерции, так как обе они являются частью одного и того же полного взаимодействия. Чтобы различить их, мы должны выяснить, ускоряются источники или нет (глобальный метод). По совершенно аналогичным причинам мы не смогли бы различить статическую и радиационную части электрического поля, если бы ограничились лишь локальными наблюдениями.

Однако важно заметить, что существует метод, позволяющий отличать силы тяготения от сил инерции, который является промежуточным между локальным и глобальным (рис. 9). Когда ящик покоится на поверхности Земли, тела, которые наблюдатель выпускает из рук, будут двигаться по направлению к центру Земли и, следовательно, по направлению друг к другу. Напротив, когда ящик находится в свободном пространстве и ему сообщается ускорение, эти тела будут двигаться, сохраняя постоянное расстояние друг от друга. Другими словами, поле сил тяготения неоднородно, тогда как поле сил инерции однородно. Таким образом, если наблюдать область пространства, достаточно большую, чтобы заметить неоднородность, можно различить силы инерции и тяготения, ничего не зная об источниках этих сил. Следовательно, принцип эквивалентности справедлив только при строго локальных наблюдениях. Несмотря на такое ограничение, принцип эквивалентности имеет огромное значение не только с исторической точки зрения (как первое предположение о связи инерции и тяготения), но и с научной. Мы всегда можем вычислить непосредственно действие сил инерции на любую физическую си-

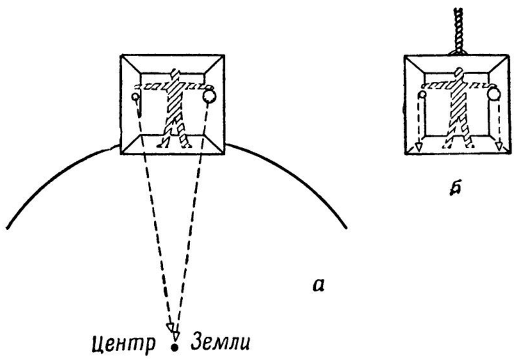


Рис. 9. *а* — наблюдатель, стоящий неподвижно на поверхности Земли, отпускает два шара. Каждый шар движется по направлению к центру Земли, и, следовательно, они падают, приближаясь друг к другу. *б* — наблюдатель, движущийся с ускорением в свободном пространстве, отпускает два шара. Шары движутся параллельно друг другу.

стему, и это дает нам возможность судить о действии поля тяготения, отвлекаясь от его неоднородности, которая зачастую очень незначительна (как на рис. 9). Следующая глава посвящена применению этого важного принципа.

Глава 5

ГРАВИТАЦИОННОЕ КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ

Введение

Большое преимущество принципа эквивалентности заключается в том, что он позволяет объяснить эффекты, вызванные однородным полем тяготения, *не используя при этом никакой теории тяготения*. Такая теория необходима только для расчета эффектов, связанных с неоднородностью поля. Причина этого заключается в том, что однородное поле тяготения действует так же, как поле сил инерции, а эти силы мы можем вычислить непосредственно. Все, что нам нужно сделать, — это предположить, что рассматриваемая система ускоряется относительно инерциальной системы отсчета.

Тяготение и длина волны света

Наиболее известным примером, иллюстрирующим этот способ расчета, является вычисление изменения длины волны света, распространяющегося в поле тяготения. Предположим, что свет идет с потолка лаборатории вниз, как показано на рис. 10. Поскольку высота лаборатории составляет всего несколько метров, мы будем пренебрегать тем, что сила тяжести на потолке меньше, чем на полу. Поэтому практически мы имеем дело с однородным полем. Это позволяет нам «выключить» поле тяготения и представить себе, что в момент испускания света лаборатория начинает ускоренно двигаться вверх с ускорением g (относительно инерциальной системы отсчета). Согласно принципу эквивалентности, это ничего не изменит в явлениях, происходящих в лаборатории.

Теперь можно подсчитать изменение длины волны света, идущего с потолка на пол. Если высота лаборатории равна h, то для прохождения этого пути свету необходимо время около h/c. Истинное время будет немного меньше, так как пол лаборатории движется ускоренно и, следовательно, свет проходит расстояние меньше h. Мы не задаемся целью получить точный ответ, поэтому не будем принимать это обстоятельство во внимание. Но нельзя пренебречь тем, что, пока свет находится в пути, пол лаборатории приобретает определенную скорость в вертикальном направлении. Поэтому при измерении длины волны света приборами, рас-

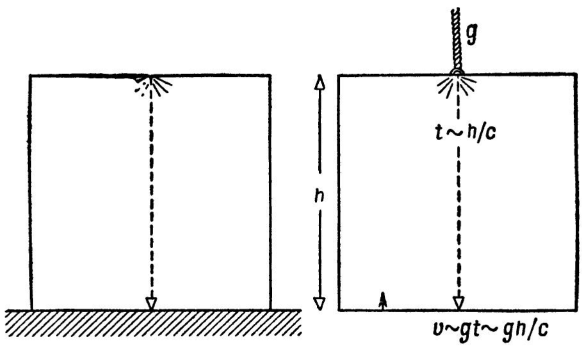


Рис. 10. *а* — свет идет с потолка лаборатории, находящейся на Земле, на пол. *б* — эквивалентная ситуация, но лаборатория находится в космическом пространстве и ускоряется в вертикальном направлении. За время пока свет проходит свой путь, пол лаборатории приобретает некоторую скорость, направленную вверх

положенными на полу, ее величина будет отличаться от длины волны света, выходящего из источника. Это явление называется эффектом Допплера (см., например, книгу Г. Бонди «Относительность и здравый смысл»).

Какова же величина этого эффекта? Если скорость пола в момент, когда на него падает свет, будет равна v, то изменение длины волны $\delta\lambda$ найдется из отношения

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = -\frac{v}{c}.$$

Здесь мы вводим еще одно приближение, пренебрегая эффектом Допплера второго порядка. Знак минус поставлен потому, что приемник движется навстречу источнику и длина волны уменьшается (фиолетовое смещение). Пол приобретает скорость v за счет того, что он в течение времени

h/c движется с ускорением g. Поэтому, согласно законам равноускоренного движения,

$$v = \frac{gh}{c}.$$

Допплеровское смещение является в данном случае фиолетовым и равно по величине gh/c^2.

С точки зрения теории тяготения gh — это *разность потенциалов поля тяготения* между источником и приемником. Если обозначить эту разность через $\delta\varphi$, то можно сказать, что при прохождении разности потенциалов тяготения $\delta\varphi$ длина волны света изменяется на $\delta\varphi/c^2$. Этот эффект обычно называется *эйнштейновским*, или *гравитационным, красным смещением*. «Красным» это смещение было названо потому, что в первых попытках определения этого эффекта использовался свет, испускаемый Солнцем и звездами особого класса, называемыми белыми карликами. В этих случаях наблюдаемый нами свет распространяется в основном против направления силы тяжести, длина волны света увеличивается, т. е. имеет место красное смещение.

Гравитационное красное смещение на Солнце

Эти первые попытки в свое время считались удачными, и именно так написано в старых книгах по теории относительности. Но теперь выяснилось, что эти наблюдения являются или неопределенными, или же трудными для интерпретации вследствие усложняющих факторов чисто астрономической природы. Такое положение очень неприятно, так как в принципе этот эффект достаточно велик и его можно измерить. Например, потенциал на поверхности Солнца равен GM/R. Здесь G — постоянная тяготения, равная $6{,}7 \cdot 10^{-8}$ *см*^{3}/*г*·*сек*^{2}, масса Солнца M равна $2 \cdot 10^{33}$ *г*, а его радиус составляет $7 \cdot 10^{10}$ *см*. Отсюда величина потенциала на Солнце равна $\sim 2 \cdot 10^{15}$ *см*^{2}/*сек*^{2}. Поскольку Солнце удалено от нас на расстояние $1{,}5 \cdot 10^{13}$ *см*, потенциал, создаваемый Солнцем на поверхности Земли, около 10^{13} *см*^{2}/*сек*^{2}. Потенциал самой Земли на ее поверхности около 10^{12} *см*^{2}/*сек*^{2} (масса Земли $6 \cdot 10^{27}$ *г*, а ее радиус $6 \cdot 10^8$ *см*). Таким образом, разность потенциалов $\delta\varphi$ между точками поверхности Солнца и Земли равна примерно

$2 \cdot 10^{15}$ *см²/сек²* (для наших целей можно считать, что Земля находится в точке нулевого потенциала). Строго говоря, поле тяготения Солнца довольно неоднородно, так как оно уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. Поэтому мы должны сделать некоторое предположение о влиянии этой неоднородности на длину волны света. Для простоты примем, что никакого влияния неоднородность не оказывает. Предсказанное красное смещение $\delta\lambda$ будет равно

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{2 \cdot 10^{15}}{c^2} = 2 \cdot 10^{-6}.$$

Конечно, это очень малая величина. Но, оказывается, в спектре Солнца есть темные спектральные линии, положение которых можно измерить очень точно. Эти линии дают характерную картину, которая позволяет отождествить химические элементы, образующие спектр. Сравнивая длину волны линии в спектре Солнца с длиной волны линии соответствующего элемента в спектре, полученном в лаборатории, можно определить красное смещение.

Во всяком случае на это надеялись. Гравитационное красное смещение было действительно обнаружено, но его величина оказалась зависящей от положения на Солнце области, из которой приходит свет. Оно минимально, когда наблюдается центр солнечного диска, и максимально, когда свет идет от края диска. Это явление понято еще неполностью, но оно не противоречит принципу эквивалентности. Несколько чисто астрофизических явлений также приводит к красному смещению, и нет оснований отрицать, что они не меняются в зависимости от положения наблюдаемой области на Солнце. Еще одна трудность состоит в том, что исследуемые линии имеют асимметричную форму, которая заменяется в зависимости от положения на Солнце. Наблюдаемое красное смещение имеет величину того же самого порядка, что и эйнштейновское красное смещение, но, до тех пор пока не будут выяснены полностью физические условия, при которых образуются линии спектра, имеющиеся наблюдения нельзя рассматривать как убедительный оптический эксперимент по проверке правильности принципа эквивалентности.

Белые карлики

Попытка использовать белые карлики для проверки принципа эквивалентности также принесла разочарование.

История белых карликов началась свыше ста лет назад, когда немецкий астроном Бессель, первым измеривший расстояние до звезд*, заметил, что Сириус периодически изменяет свое положение, как если бы на него действовала сила тяготения находящейся поблизости звезды-спутника. Этот спутник был открыт в предсказанном месте в 1862 г. Его массу легко было вычислить по гравитационному воздействию на Сириус, и она оказалась примерно равной массе Солнца. На первый взгляд могло показаться, что это не очень интересная звезда. Но в 1915 г. Адамсу удалось определить ее радиус. Он оказался равным всего лишь $^1/_{50}$ радиуса Солнца, т. е. звезда была карликом. Но что особенно поражает воображение — это плотность звезды: 10^5 *г/см³*, или сто тысяч тонн в кубическом метре!

Этот результат, естественно, вызвал большие подозрения. Разумное объяснение этому факту дал в 1924 г. Эддингтон, который показал, что такие высокие плотности вполне согласуются с атомной структурой вещества. Обычно сжатию вещества до высокой плотности препятствуют электронные оболочки, окружающие каждое атомное ядро и отталкивающие атомы друг от друга. Но при высоких температурах, которые существуют в звездах, электронные оболочки разрушаются, поэтому ядра атомов могут очень сильно сблизиться друг с другом. Электроны движутся по всей массе вещества, но уже не принадлежат определенным ядрам.

Это высоко конденсированное состояние вещества было замечательным открытием и большой удачей Эддингтона, который пытался найти экспериментальное подтверждение принципа эквивалентности. Поскольку спутник Сириуса — Сириус В — имеет такую же массу, как Солнце, а его радиус составляет всего лишь $^1/_{50}$ радиуса Солнца, то потенциал тяготения на его поверхности в 50 раз больше, чем на поверхности Солнца. Ожидаемое гравитационное красное смещение тоже должно быть больше в 50 раз. По совету

---

* Одновременно и независимо от Ф. Бесселя расстояния до звезд были измерены русским астрономом В. Я. Струве и английским астрономом Т. Гендерсоном. — *Прим. перев.*

Эддингтона Адамс измерил красное смещение. Он, конечно, сделал поправку на допплеровское смещение, обусловленное обращением этой звезды вокруг Сириуса. Выполнив все расчеты, он заявил, что красное смещение близко к теоретически предсказанному.

Этот результат был принят восторженно и приведен в большинстве учебников, но, к сожалению, он не выдержал критической проверки. Более позднее исследование показало, что использованное Адамсом значение радиуса Сириуса В было неточным и что спектр Сириуса В так смешан со спектром самого Сириуса, что смещение линий невозможно надежно измерить. Такая же печальная участь постигла другие попытки измерений гравитационного красного смещения по белым карликам*.

Проверка в лаборатории

Эта неприятная ситуация сохранялась до 1960 г., когда две группы экспериментаторов — одна в Харуэлле, Англия, другая в Гарварде — попытались измерить гравитационное красное смещение в лаборатории. Раньше такой опыт рассматривался как абсолютно безнадежное дело. Ведь если свет проходит в поле тяготения путь всего лишь несколько метров, то $\delta\lambda/\lambda$ (равное gh/c^2) составляет только около 10^{-15}, т. е. более чем в миллиард раз меньше солнечного смещения! Однако в 1958 г. молодой немецкий физик Мёссбауэр сделал выдающееся открытие. Он обнаружил, что при некоторых условиях твердые тела испускают гамма-лучи строго определенной длины волны, причем эта длина волны выдерживается постоянной с точностью лучше 10^{-12}. Обратно, некоторые твердые тела позволяют зарегистрировать гамма-излучение только в тех случаях, если длина волны этого излучения не будет отличаться от характерной для данного тела длины волны больше чем на 10^{-12}.

Тщательно измеряя форму линии гамма-излучения, можно определить смещение ее частоты, которое составляет всего около 1% указанной величины, т. е. примерно с точностью до 10^{-15}. Этой точности уже достаточно для определения гравитационного красного смещения в лаборатории.

---

* Недавно Гринстейн и Тримбл сообщили, что они установили реальность гравитационного красного смещения у белых карликов [Astrophysical Journal, 149, 283 (1967)].

Эту идею подхватили харуэллские и гарвардские ученые. Первыми опубликовали результаты ученые из Харуэлла в феврале 1960 г. В их эксперименте гамма-лучи проходили по вертикали расстояние 12,5 *м*, соответствующее смещению $\delta\lambda/\lambda$, равному $1{,}36 \cdot 10^{-15}$. Красное смещение, наблюдаемое ими, составило $0{,}96 \pm 0{,}45$ теоретического значения. Однако в апреле 1960 г. Джозефсон из Кембриджского университета указал, что результат такого эксперимента в значительной мере зависит от т е м п е р а т у р ы источника и детектора, так как излучающие и поглощающие атомы колеблются в кристаллической решетке, причем тем быстрее, чем выше температура. Эти движения будут также вызывать допплеровские смещения.

Из специальной теории относительности известно (см. Г. Бонди, «Относительность и здравый смысл»), что существует допплеровское смещение первого порядка, пропорциональное скорости, и смещение второго порядка, пропорциональное квадрату скорости. Поскольку атомы за время, пока испускаются гамма-лучи, совершают много колебаний около положения равновесия, эффект первого порядка не проявляется: происходит большое количество как фиолетовых, так и красных смещений, и, следовательно, суммарный эффект первого порядка равен нулю. Но эффект второго порядка является красным смещением независимо от направления движения источника ($[-v]^2 = v^2$). Если источник и детектор имеют одинаковую температуру, то гамма-лучи, «краснеющие» при испускании, будут достаточно «красными» для того, чтобы их можно было зарегистрировать детектором (если эффект Эйнштейна действительно существует). Но если источник и детектор имеют разные температуры, то зарегистрировать их будет невозможно. Действительно, Джозефсон вычислил, что разность температур всего лишь в 1° привела бы к измеряемому смещению линии $2 \cdot 10^{-15}$. Это больше ожидаемого гравитационного красного смещения, а значит, необходим тщательный контроль температур. В Харуэлле влияние температуры не учитывалось.

В гарвардской группе (Паунд и Ребка) обратили внимание на влияние температуры независимо от Джозефсона и указали на это в марте 1960 г. Они также экспериментально проверили существование этого эффекта. В апреле 1960 г. они опубликовали свои результаты по измерению гравитационного красного смещения. В их эксперименте гамма-лучи проходили по вертикали в башне Джефферсоновской физической лаборатории расстояние 22 *м*. Предсказанное смещение $\delta\lambda/\lambda$ было $4{,}92\cdot10^{-15}$, а наблюдаемое $(5{,}13\pm0{,}51)\cdot10^{-15}$. После стольких превратностей гравитационное красное смещение было наконец обнаружено*.

Гравитационное красное смещение как энергетический эффект

При выводе гравитационного красного смещения мы «выключали» поле тяготения и «включали» ускоряющий трос. Возникающий эффект Допплера и давал нам гравитационное смещение. Это совершенно законное применение принципа эквивалентности, но при этом умалчивается о непосредственном действии поля тяготения. Если материальное тело падает под действием силы тяжести, то оно приобретает энергию. Нельзя ли рассмотреть гравитационное красное смещение с этой точки зрения?

Оказывается можно, но с одной оговоркой. Увеличение энергии материального тела проявляется в возрастании его скорости, а увеличение энергии света — в у м е н ь ш е н и и е г о д л и н ы в о л н ы. Это не является неожиданностью, если вспомнить, как два движущихся друг относительно друга наблюдателя измеряют энергию в специальной теории относительности. Если энергия заключена в материальном объекте, то для обоих наблюдателей его скорость, а, следовательно, и его кинетическая энергия будут различны. Если же энергию несет свет, то его скорость будет для обоих наблюдателей о д и н а к о в о й, но длина волны будет р а з н о й. Если мы представим свет состоящим из частиц (фотонов) с энергией E, то частота ν и длина волны λ света связаны с E формулой Эйнштейна (см. Г. Бонди, «Относительность и здравый смысл»)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

Здесь h — постоянная Планка, которая одинакова для всех наблюдателей. Наша формула означает, что при увеличении энергии фотона длина волны света уменьшается.

* Один из последующих экспериментов Паунда и Снайдера подтвердил предсказание Эйнштейна с точностью до 1% [Physical Review Letters, **13**, 539 (1964)].

То, что поле тяготения влияет на энергию фотона, является частным случаем общего положения. Мы знаем из специальной теории относительности, что всякой энергии соответствует инертная масса. Мы также знаем из принципа эквивалентности, что силы тяготения пропорциональны инертной массе, на которую они действуют. Если мы объединим эти два принципа, то придем к выводу, что тяготение действует на *все* формы энергии.

Сформулируем это утверждение в более строгой форме. Физическая система обладает энергией, так как она обладает инертной массой. Наличие инертной массы подразумевает, что эта масса оказывает сопротивление, когда ее ускоряют, — для ускорения нужно преодолеть силы инерции. Это сопротивление, эти силы инерции мы сейчас отнесли к силам тяготения. Следовательно, вместо того чтобы говорить «тяготение действует на все формы энергии», мы можем сказать «физическая система обладает энергией, поскольку на нее действует тяготение».

Глава 6

ЭЙНШТЕЙНОВСКИЕ УРАВНЕНИЯ ПОЛЯ

Введение

До сих пор мы не пытались сформулировать точного закона гравитационно-инерциального взаимодействия. Мы выделили в этом взаимодействии статическую часть и часть, зависящую от ускорения, не рассматривая компоненту, зависящую от скорости, и угловую зависимость. Только Эйнштейн смог вывести достаточно общий закон, описывающий все свойства гравитационно-инерциального взаимодействия. В этой главе мы рассмотрим соображения, на основании которых удалось подойти к такому общему закону. Главная новая особенность, которая должна быть рассмотрена, состоит не во введении недостающих компонент взаимодействия, упомянутых выше, а в учете специфического свойства гравитационно-инерциального взаимодействия, которое не имеет никакого аналога с электрическим взаимодействием, — *нелинейности*.

Нелинейность гравитационно-инерциального взаимодействия

Чтобы понять, что подразумевается под нелинейностью, давайте сначала рассмотрим более простой случай — электрическое взаимодействие, которое является линейным. Линейность означает, что полная сила, вызываемая несколькими зарядами, является просто суммой сил, порождаемых каждым зарядом; при этом предполагается, что каждый заряд действует независимо от других. Если эти отдельные силы действуют в разных направлениях, то мы должны построить векторную сумму, как показано на рис. 11, *а*. Это обычный закон сложения сил (правило параллелограмма), известный из элементарной статики. Примененное нами правило сложения означает, что сила, вызванная одним зарядом, не изменяется от присутствия других зарядов. Взаимодействие, которое обладает таким свойством, называют *линейным*. Напротив, взаимодействие является *нелинейным*, если результирующая сила, создаваемая несколькими телами, не равна сумме сил, порождаемых каждым телом в отдельности.

Почему гравитационно-инерциальное взаимодействие нелинейно? Для этого есть глубокие основания. Мы видели в конце предыдущей главы, что любая форма энергии обладает массой и, следовательно, действует как источник

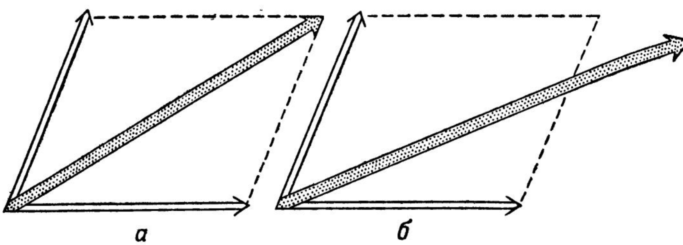


Рис. 11. Линейное и нелинейное сложение сил. *а* — обычный способ сложения сил по правилу параллелограмма; *б* — нелинейное сложение сил. В этом случае, если две силы действуют одновременно, результирующую силу нельзя получить по правилу параллелограмма.

сил тяготения и инерции. Это верно не только для вещества и света, но также и для потенциальной энергии тяготения. Мы знаем, что эта форма энергии реально существует и, значит, должна включаться в полный баланс энергии.

Когда тело падает под действием силы тяжести, оно приобретает кинетическую энергию за счет потенциальной энергии тяготения. Масса, связанная с этой энергией, действует как источник тяготения и инерции и тогда, когда эта энергия представлена в форме кинетической энергии, и тогда, когда она существует в форме потенциальной. Иными словами, если два тела совместно действуют как источник сил тяготения, мы должны, кроме их индивидуальных масс, учитывать в качестве источника сил тяготения также их общую потенциальную энергию тяготения. В таком случае полная сила уже не будет равна сумме сил, создаваемых телами порознь (рис. 11, *б*).

Отсюда следует, что точная картина взаимодействия между произвольным количеством тел будет весьма сложна. И действительно, как мы увидим ниже, это взаимодействие нельзя записать в явном виде. Поэтому проведенные нами вычисления полной силы инерции, обусловленной всем веществом Вселенной, не являются строго корректными; более того, их очень трудно выполнить точно. Можно только надеяться, что линейное приближение дает правильный порядок величины. Из соображений размерности мы предполагаем, что должно существовать соотношение вида

$$\frac{G\rho R^2}{c^2} \sim 1,$$

которое вытекает из линейной теории. Сомнение вызывает лишь значение правой части, и, по-видимому, точная теория дала бы вместо единицы величину типа $3/8\pi$.

Как же смог Эйнштейн, несмотря на все эти трудности, вывести достаточно общий закон, описывающий все свойства нелинейного гравитационно-инерциального взаимодействия? Ответ заключается в том, что он, исходя из представлений теории поля, описал локальные свойства взаимодействия. На этой основе в принципе можно определить глобальные свойства взаимодействия между удаленными друг от друга телами, хотя практически это нельзя сделать точно даже для двух тел, кроме предельного случая, когда масса одного из них пренебрежимо мала по сравнению с массой другого. Тем не менее этот подход имеет большое значение, и мы посвятим ему оставшуюся часть главы.

Подход с точки зрения теории поля

Уже несколько раз на страницах этой книги мы сталкивались с двумя противоположными подходами к изучению взаимодействия тел. Рассматривая прямое взаимодействие частиц, мы просто записывали закон взаимодействия между различными частицами, каково бы ни было расстояние между ними. В теории поля мы ограничивались рассмотрением взаимодействия между близлежащими областями пространства. На частицу действует поле, существующее в ее окрестности, величина которого зависит в свою очередь от поля в его окрестности, и так далее, пока мы наконец не доберемся до частиц, являющихся источниками поля. На первый взгляд такой подход выглядит довольно искусственным, но очень многое говорит в его пользу. В частности, законы, определяющие изменения полей в пространстве и времени, нередко гораздо проще, чем законы, описывающие прямое взаимодействие, и для многих физических задач легче получить требуемое решение, используя эти более простые законы. Это заведомо относится и к гравитационно-инерциальному взаимодействию, уравнения поля для которого, хотя и выглядят сложно, но могут быть по крайней мере записаны в явном виде, тогда как строгий вид законов для прямого взаимодействия частиц в этом случае просто не известен.

Начнем изложение подхода с точки зрения теории поля с вопроса о линейности или нелинейности взаимодействия. Тот факт, что электрические силы аддитивны, можно выразить по-разному. Можно сказать, например, что полное электрическое поле, образованное несколькими источниками, является суммой полей, образованных отдельными источниками, действующими в отсутствие других. Когда электрический заряд движется ускоренно, порождаемое им поле включает в себя электромагнитные волны, которые распространяются со скоростью света. Если такая волна проходит через область пространства, содержащую электрическое поле, то полное поле будет просто суммой этих двух полей. Иными словами, электрическое поле не оказывает влияния на электромагнитную волну. Если две волны сталкиваются, то каждая из них продолжает двигаться так, как если бы второй волны вовсе не было, они проходят одна через другую, не действуя друг на друга. Этот факт можно выразить иначе, сказав, что *электромагнитные волны электрически нейтральны*. Если бы они были заряжены, они бы воздействовали друг на друга (рассеивали друг друга), как это происходит при электромагнитном взаимодействии заряженных частиц.

Но именно такое действие одной заряженной частицы на другую совсем не характерно для линейной теории поля. Заряд порождает поле в соответствии с законами этой теории, но это поле не будет действовать на другой заряд до тех пор, пока в теорию не будет явно введен еще один закон, требующий взаимодействия поля с зарядом. Чтобы пояснить, почему это так, рассмотрим отдельный движущийся заряд. В соответствии с законами линейной теории он будет порождать электромагнитное поле. Рассмотрим затем еще один движущийся заряд. Он также будет порождать некоторое поле. Теперь предположим, что оба заряда движутся одновременно. Поскольку законы поля линейны, они будут выполняться, если каждый заряд движется так, как если бы он был один, причем полное поле оказывается просто суммой обоих отдельных полей. Фактически это означает, что заряды не влияют на движение друг друга. Чтобы заряды взаимодействовали, нужно ввести другой закон, который требовал бы, чтобы поле одного заряда действовало на другой заряд.

В случае гравитационно-инерциального взаимодействия все обстоит по-другому. Мы знаем, что в этом случае законы поля нелинейны, так что поле, порождаемое какой-либо массой, зависит от наличия других масс. Таким образом, масса «замечает» присутствие других масс, и поэтому законы поля сами по себе достаточны, чтобы установить взаимодействие между массами, причем отпадает необходимость введения в теорию дополнительного закона. Как мы увидим, это действительно так, если только удовлетворяется некоторое дополнительное условие, и эйнштейновский закон поля построен таким образом, чтобы это дополнительное условие удовлетворялось автоматически.

Другое отличие от случая электромагнитного взаимодействия состоит в том, что гравитационная волна, порождаемая ускоряющейся массой, подвержена влиянию гравитационного поля, через которое она проходит. Поэтому две гравитационные волны будут рассеивать друг друга. Иными словами, в то время как электромагнитные волны электрически нейтральны, гравитационные волны не являются гравитационно-нейтральными: они несут энергию и, следовательно, *массу*, а поэтому действуют как **источник тяготения**.

Очень поучительно посмотреть на это «самовзаимодействие» гравитационного поля с несколько иной точки зрения. Рис. 12, *а* показывает гравитационный «луч», распространяющийся, подобно световому лучу, по прямой линии со скоростью света. Рис. 12, *б* изображает этот луч во вращающейся системе отсчета. Как и материальная частица на рис. 4, луч во вращающейся системе отклоняется от прямой линии (см. также рис. 13). Относительно этой системы отсчета отклонение является следствием действия сил Кориолиса. Таким образом, силы инерции действуют на гравитационные волны, и, если принцип эквивалентности верен, на гравитационные волны должны действовать и

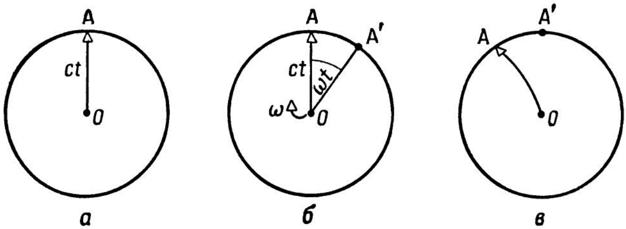


Рис. 12. *а* — гравитационный луч, движущийся по прямой с постоянной скоростью *c*, наблюдается в инерциальной системе отсчета. Ко времени *t* он пройдет расстояние *ct* в направлении к точке *A*. *б* — система отсчета, вращающаяся с угловой скоростью ω, повернется за время *t* на угол ω*t*, причем точка, которая сначала была в *A*, передвинется в *A'*. *в* — относительно вращающейся системы отсчета точка *A'* неподвижна, и луч изгибается, стремясь попасть в *A*. Таким образом, силы Кориолиса действуют на гравитационные лучи (ср. с рис. 4).

силы тяготения. Отсюда видно, насколько существенным является «самовзаимодействие» тяготения. Это одно из проявлений того факта, что тяготение действует на «все на свете».

Законы поля

Чтобы сформулировать закон поля для гравитационно-инерциального взаимодействия, мы можем опять воспользоваться формой законов для других типов взаимодействий. Несмотря на специфические особенности, которые необходимо учитывать, мы можем начать с полезной аналогии с другими типами взаимодействий. Мы ищем закон поля, который должен дать (по крайней мере приближенно) статическое взаимодействие между массами, обратно пропорциональное квадрату расстояния, а также взаимодействие, зависящее от ускорения и обратно пропорциональное первой степени расстояния.

Ньютонов закон тяготения описывает статическое взаимодействие. На языке теории поля существует потенциал тяготения, скорость изменения которого в каком-либо направлении определяет поле тяготения в этом направлении*. Закон поля для этого потенциала имеет

* На языке векторного анализа поле является градиентом (скалярного) потенциала.

форму дифференциального уравнения, которому удовлетворяет этот потенциал и в которое включена плотность вещества, действующего как источник. Это уравнение называется *уравнением Пуассона**. Строго говоря, это уравнение применимо только в статическом случае. Если источники движутся и если мы предполагаем, что изменения поля тяготения распространяются, подобно изменениям электромагнитного поля, со скоростью света, то вместо уравнения Пуассона мы должны воспользоваться уравнением *Даламбера***.

В электромагнитной теории ситуация несколько сложнее, так как электромагнитные явления описываются двумя полями: электрическим и магнитным. Эти поля удовлетворяют дифференциальным уравнениям, куда заряды и плотности тока входят в качестве источников. Когда рассматривается нестатическое взаимодействие, мы приходим к известным уравнениям Максвелла. Если воспользоваться потенциалом, то нельзя ограничиться одним потенциалом, как в теории Ньютона, потому что скорость его изменения давала бы нам только одно поле. Более подробное исследование показывает, что необходимы четыре потенциала***. Законы поля можно выразить через эти четыре потенциала, каждый из которых удовлетворяет уравнению Даламбера****. Нам нужны также четыре параметра источника, по одному на каждый потенциал. Этими параметрами являются плотность заряда (одна величина) и плотность тока (три величины, по одной на каждое из трех направлений в пространстве).

Сколько потенциалов нужно, чтобы описать гравитационно-инерциальное поле? Подробное изучение структуры сил инерции показывает, что необходимы десять потенциалов. Поскольку мы ищем законы, приводящие (по

---

* На языке векторного анализа $\nabla^2\varphi = \rho$.

** На языке векторного анализа $\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\varphi = \rho$, или, как часто пишут, $\Box\varphi = \rho$.

*** Векторный потенциал $\mathbf{A}$ и скалярный потенциал φ.

**** $\Box\mathbf{A} = \mathbf{j}$, где $\mathbf{j}$ — плотность тока, и $\Box\varphi = \rho$, где ρ — плотность заряда. Эти потенциалы должны быть выбраны так, чтобы они удовлетворяли условию $\operatorname{div}\mathbf{A} + \frac{1}{c}\frac{\partial\varphi}{\partial t} = 0$, что всегда возможно. В противном случае уравнения поля содержат еще несколько членов.

крайней мере приближенно) к взаимодействию масс, в некоторой степени подобному взаимодействию зарядов, можно ожидать, что каждый из этих десяти потенциалов удовлетворяет уравнению Даламбера. Что же можно сказать об источниках? До сих пор мы сталкивались только с массой, действующей как источник, и масса была единственным источником поля. Однако если мы имеем дело с протяженными телами, а не с точечными частицами, то в инерциальных свойствах системы играют роль также внутренние напряжения, которые, по-видимому, также действуют как источники поля. Именно поэтому теперь необходимы 10 величин, чтобы описать источник. Таким образом, мы располагаем требуемым числом параметров, характеризующих источник, чтобы иметь возможность записать 10 уравнений Даламбера, по одному на каждый из 10 потенциалов.

Но это еще не все. Мы должны помнить, что поле тяготения само по себе обладает энергией и массой и, следовательно, является источником тяготения. Значит, в свою очередь нам необходимы 10 величин, описывающих этот источник; ясно, что нужно добавить эти величины к введенным ранее. Тогда получается самовзаимодействующее поле тяготения, удовлетворяющее нелинейному закону поля.

Так мы пришли к эйнштейновским уравнениям поля. Они отличаются от уравнений Максвелла в двух аспектах:

а) вместо четырех потенциалов появилось десять;

б) поле тяготения само оказывается источником тяготения, тогда как электромагнитное поле не является источником электромагнитного поля.

И наконец, заключительное замечание. Гравитационные уравнения, построенные описанным выше образом, приводят к тому, что источник сохраняется (как сохраняется и заряд в электромагнитной теории). Этот закон сохранения соответствует сохранению энергии. Поскольку источник, кроме гравитационной, обладает и другими формами энергии, закон сохранения допускает обмен энергией между материальной системой и тяготением; это соответствует очевидному условию, в силу которого падающее тело приобретает кинетическую энергию за счет потенциальной энергии тяготения и наоборот. Этот закон сохранения является последним условием, которое нам нужно удовлетворить, чтобы гравитационное взаимодействие между телами содержалось в законах поля (см. стр. 62). Другими словами, мы не нуждаемся в аналоге силового закона в электромагнетизме — закона, описывающего действие электрического поля E на заряд e:

$$F = eE.$$

Следовательно, имеется третье отличие от теории Максвелла:

в) уравнения Эйнштейна уже сами по себе определяют гравитационное взаимодействие между телами, тогда как уравнения Максвелла сами по себе не описывают электромагнитного взаимодействия между заряженными телами.

Глава 7

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ СОЛНЦА

Введение

Мы пришли к эйнштейновским уравнениям поля на основе довольно общих соображений. Эти соображения очень убедительны, но абсолютной уверенности в их справедливости, конечно, нет, и крайне желательно получить независимое экспериментальное подтверждение справедливости уравнений Эйнштейна. Эту проверку надо производить, рассматривая явления, не подчиняющиеся теории Ньютона, т. е. теории, в основе которой лежит один потенциал и линейное уравнение поля (самовзаимодействие отсутствует). Поэтому нам хотелось бы иметь непосредственное экспериментальное доказательство существования

а) десяти потенциалов;

б) гравитационного эффекта тяготения.

Существуют данные, подтверждающие обе эти особенности теории Эйнштейна. Правда, эти данные никоим образом нельзя считать окончательными. В этой главе мы рассмотрим данные, подтверждающие пункт (а); они касаются искривления лучей света звезд, когда луч проходит вблизи Солнца. Нелинейное свойство (б) проявляется в орбитальном движении планет вокруг Солнца, как мы увидим в следующей главе.

Силы инерции и лучи света

Обычно считается, что свет движется по прямой. Тем самым неявно подразумевается инерциальная система отсчета. Относительно неинерциальной системы свет не будет двигаться по прямой. Следовательно, силы инерции отклоняют свет, и мы можем ожидать, что *силы тяготения также отклоняют свет.* Наблюдать этот эффект в лаборатории нельзя, так как поле тяготения Земли слишком слабо, чтобы заметно отклонить свет. Чтобы найти заметный эффект, мы должны обратиться к астрономическим объектам.

Чтобы понять, как силы инерции действуют на свет, представим себе наблюдателя, расположившегося на вращающейся платформе (рис. 13). Луч света выходит из центра платформы и движется по прямой линии относительно невращающегося (т. е. инерциального) наблюдателя. Нашему вращающемуся наблюдателю траектория луча кажется изогнутой (рис. 13, *в*). Читатель может вспомнить,

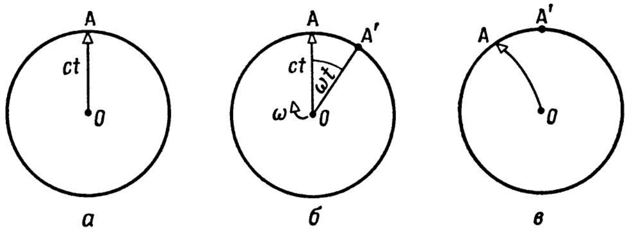


Рис. 13. *а* — движение света в инерциальной системе отсчета. Луч света движется по прямой с постоянной скоростью c. За время t он проходит расстояние ct к точке A. *б* — система, вращающаяся с угловой скоростью ω, поворачивается за время t на угол ωt, при этом точка, которая первоначально была в A, переходит в положение A'. *в* — относительно вращающейся системы точка A' неподвижна, и луч изгибается, чтобы достичь A. Таким образом, силы Кориолиса действуют на световые лучи (ср. с рис. 4 и 12).

что то же самое происходило с траекторией материального предмета, брошенного из центра вращения*. Его траектория тоже была изогнутой, и этот изгиб приписывался действию кориолисовой силы. Сила инерции, конечно, действует и на свет, откуда мы делаем вывод, что *силы инерции могут искривлять траекторию светового луча.*

Это заключение важно, но не является откровением. Мы знаем и другие случаи искривления пути света. Лучше других изучено *преломление*, наблюдаемое при переходе света из воды в воздух. Это явление наблюдается на любой поверхности раздела двух сред с разными показателями преломления. В случае границы вода — воздух свет движется по прямой в каждой из этих сред, но направление прямой резко меняется на границе раздела. Более близкая

* То же самое произойдет и с гравитационным лучом (см. стр. 63—64).

аналогия с эффектом действия сил инерции была бы в среде, показатель преломления которой непрерывно изменяется в зависимости от положения (например, если плотность среды непрерывно изменялась бы в некотором направлении). Луч света, движущийся в такой среде, выглядел бы как плавная кривая. Благодаря этой аналогии мы можем описать эффект действия сил инерции на свет, сказав, что

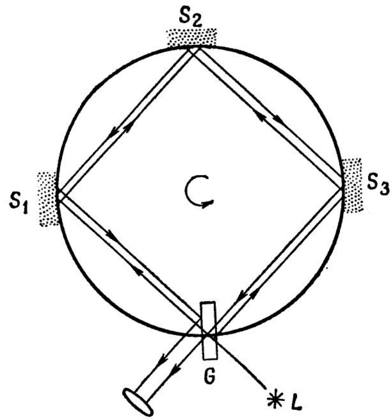


Рис. 14. Эксперимент Саньяка является вращательным аналогом эксперимента Майкельсона — Морли, но в отличие от последнего дает положительный результат. Относительно вращающейся системы отсчета силы инерции изгибают траектории движения световых лучей и, следовательно, изменяют положение интерференционных полос.

силы инерции придают пространству переменный показатель преломления.

Искривление луча света во вращающейся системе отсчета означает, что при помощи оптических экспериментов можно обнаружить вращение; этого, конечно, нельзя сделать для равномерного прямолинейного движения. В 1913 г. Саньяк успешно осуществил эксперимент, являющийся аналогом опыта Майкельсона — Морли (см. Г. Бонди, «Относительность и здравый смысл») для вращения. На рис. 14 показана схема его опыта. Полупрозрачная посеребренная стеклянная пластинка G расщепляет луч света на два. Один из них движется в направлении вращения, а другой — в противоположном направлении. Оба луча затем сходятся и интерферируют. В противоположность опыту Майкельсона — Морли скорость лучей относительно вращающегося прибора оказывается р а з н о й. Свет, движущийся против направления вращения, идет быстрее, и ему требуется меньше времени, чтобы пройти по замкнутому кругу. Значит, можно ожидать, что интерференционная картина зависит от угловой скорости вращения, что и было обнаружено Саньяком. В одном эксперименте он использовал быстро вращающийся диск диаметром около метра. В другом опыте он смог обнаружить ускоренное движение корабля, движущегося по кривой. Еще более близким аналогом опыта Майкельсона — Морли было бы определение вращения самой Земли. Этот опыт был поставлен Майкельсоном и Гейлом в 1925 г. Поскольку Земля вращается сравнительно медленно, они могли получить заметный эффект, только используя путь света в несколько километров*. Конечно, в этом случае нельзя получить интерференционную картину, когда вращение отсутствует. Поэтому они сравнивали эту картину с полученной на подобном же устройстве, но с очень короткой длиной пути света, так что свету требовалось примерно одно и то же время для прохождения пути в обоих направлениях.

Успех этого эксперимента показывает, что вращение Земли может быть обнаружено оптическими экспериментами. Поскольку в этом опыте обнаруживается сила Кориолиса, мы можем назвать прибор Майкельсона — Гейла оптическим аналогом маятника Фуко. В таком случае ясно, что силы инерции наделяют пространство переменным показателем преломления, и если наши идеи о связи между силами тяготения и инерции правильны, то тогда *силы тяготения также должны наделять пространство переменным показателем преломления.*

Можно прийти к этому же результату, рассматривая э н е р г и ю, которую несет свет (или вообще электромагнитные волны). Энергия света связана с определенной массой, и, следовательно, можно предположить, что она подвержена действию тяготения (и будет источником тяготения). Выясним, насколько велик этот эффект.

* Недавно вращение Земли было выявлено в лабораторных условиях при помощи кольцевого лазера.

Силы тяготения и лучи света

Именно теперь и появляются наши десять потенциалов. Если бы мы рассчитывали искривление траектории света по теории тяготения Ньютона с ее одним потенциалом (эта теория предполагает, что траектория света точно такая же, как и траектория материальной частицы, движущейся со скоростью света), то нашли бы, что показатель преломления пространства на расстоянии r от массы M равен

$$1+\frac{GM}{c^2r}.$$

Если же проделать эти вычисления с 10 потенциалами, предполагая, что нелинейные эффекты незначительны (см. ниже), то найдем, что коэффициент преломления равен

$$1+\frac{2GM}{c^2r}.$$

На поверхности Земли этот коэффициент имеет значение $1+2\cdot 10^{-9}$, и его отличие от единицы слишком мало, чтобы его можно было зарегистрировать. Поэтому Эйнштейн предложил искать этот эффект для света от звезд, проходящего вблизи Солнца.

Предложение Эйнштейна иллюстрирует рис. 15. Свет от звезды S проходит вблизи Солнца, и солнечное тяготение искривляет его траекторию. Земному наблюдателю будет казаться, что звезда смещается от Солнца. Полный угол, на который отклоняется свет, составляет

$$\frac{4GM_C}{c^2R}\text{ радиан,}$$

где M_C — масса Солнца и R — расстояние наибольшего приближения света к Солнцу. Теория Ньютона давала бы величину

$$\frac{2GM_C}{c^2R_C}\text{ радиан.}$$

Как видно из рис. 15, поскольку звезда находится очень далеко от Солнца, угол отклонения траектории света будет почти равен углу, на который сместится звезда по наблюдениям с Земли.

Смещение будет наибольшим, когда R минимально, т. е. для луча, касающегося солнечного диска. В этом случае R — радиус Солнца, и соответствующий угол отклонения равен 1″,75. На первый взгляд это очень обнадеживающий результат, так как астрономы легко могут измерить такой угол. Но из-за солнечного света, рассеянного земной атмосферой, днем звезды не видны вообще. Поэтому нужно ждать полного затмения Солнца. Благодаря удивительному

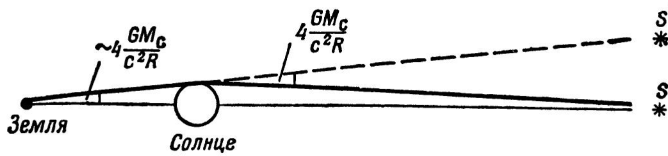


Рис. 15. Когда свет от звезды S проходит около Солнца, его путь изгибается. Поскольку звезда значительно дальше от Солнца, чем Земля, угол, на который изменяется направление света звезды S, очень близок к значению, предсказываемому теорией Эйнштейна (ср. с рис. 16).

совпадению угловой размер Луны очень близок к угловому размеру Солнца (∼0,°5), так что во время полного затмения Луна полностью закрывает солнечный диск, звезды становятся видимыми и могут быть сфотографированы. Для звезд, находящихся на большом расстоянии от Солнца, R велико, а смещение мало. Таким образом, нужно найти смещение близких к Солнцу звезд относительно положения других звезд. Чтобы измерить смещение, нужно, конечно, сфотографировать то же самое поле звезд в том же году, когда они видны ночью и свет, идущий от них , не отклоняется Солнцем.

К сожалению, наблюдения во время затмения очень трудны, и полученные результаты несколько разочаровывают. Первую попытку сделали в 1919 г. Эддингтон и Дайсон. Сообщение о том, что эта экспедиция была успешной, вызвало сенсацию: отчасти вследствие научных причин, а отчасти потому, что мир был поражен тем, как скоро после первой мировой войны англичане финансировали и провели экспедицию для проверки теории, предложенной подданным Германии. Сам Эддингтон впоследствии говорил об этой экспедиции как о самом волнующем событии в его астрономических исследованиях.

По иронии судьбы предсказание Эйнштейна отнюдь не было подтверждено столь убедительно, как это считалось. С 1919 по 1966 г. произошло чуть меньше 30 затмений, причем полное время для наблюдений составило не более двух часов. (Самое продолжительное полное затмение Солнца длится около 7,5 минуты, но такие случаи бывают очень редко.) Многие затмения не могли быть использованы: или было неподходящее поле звезд, окружающих Солнце, или продолжительность затмения была слишком мала. Иногда наблюдению затмений мешала плохая погода*, а иногда политические события. В итоге были опубликованы результаты наблюдений всего лишь шести затмений.

Кроме того, выводы основываются на абсолютных измерениях весьма малых величин, которые выполнялись в течение очень короткого времени в условиях, резко отличающихся от измерения к измерению, и производились в полевой обстановке, как правило, в отдаленных районах земного шара. К тому же внешняя солнечная атмосфера, или корона, закрывает звезды, свет от которых слегка касается солнечного диска, и из наблюденных до сих пор звезд ближайшие из них, за одним исключением, отстояли от центра Солнца больше чем на два его радиуса. Теоретическое смещение составляет в этом случае всего лишь $0'',87$.

В идеальном случае хотелось бы подтвердить не только существование смещения, но также его зависимость от расстояния от Солнца вида $1/R$. К сожалению, это оказалось невозможным, и все наблюдатели просто предполагали справедливость этого закона и экстраполировали наблюдения к значению R, равному одному солнечному радиусу. Результаты наблюдений затмений приведены в табл. 1. Оценить приведенные результаты трудно, так как другие астрономы, интерпретируя тот же самый материал, получали иные результаты. Кроме того, можно подозревать, что, если бы астрономы не знали, какую величину они «должны» получить, опубликованные результаты отличались бы куда сильнее. В летопись астрономии занесено несколько случаев, когда знание «правильного» ответа приводило к экспериментальным результатам, которые, как выяснялось позднее, оказывались вне пределов чувствительности аппаратуры!

---

* Это было причиной моей собственной неудачи в 1954 г.

Таблица 1

Обсерватория и место наблюдения	Затмение	Число звезд	Расстояние от центра Солнца в солнечных радиусах		α	Ошибка
			r_{min}	r_{max}		
Гринвичская (Бразилия) . . .	29 мая 1919 г.	7 11	2 2	6 6	1″,98 0,93	0″,16 —
Гринвичская (о. Принсипи)	То же	5	2	6	1,61	0,40
Аделаида — Гринвич (Австралия)	21 сентября 1922 г.	11—14	2	10	1,77	0,40
Виктория (Австралия)	То же	18	2	10	1,75 1,42 2,16	—
Ликская (Австралия)	То же	62—85 145	2,1 2,1	14,5 42	1,72 1,82	0,15 0,20
Потсдамская (Суматра)	9 мая 1929 г.	17—18 84—135	1,5 4	7,5 15	2,24 —	0,10 —
ГАИШ (СССР)	19 июня 1936 г.	16—29	2	7,2	2,73	0,31
Сендай (Япония)	То же	8	4	7	2,13 1,28	1,15 2,67
Йеркская (Бразилия)	20 мая 1947 г.	51	3,3	10,2	2,01	0,27
Йеркская (Судан)	25 февраля 1952 г.	9—11	2,1	8,6	1,70	0,10

Предлагались и другие методы для измерения искривления световых лучей полем тяготения, но ни один из них не оказался практически применимым. Свет, идущий по касательной к планете Юпитер, отклонился бы на 0″,017. Такой угол можно было бы измерить при помощи наиболее совершенной современной аппаратуры, если бы не яркое свечение самого Юпитера. Многих увлекал метод обнаружения искривления траектории света по наблюдениям двойных звезд, компоненты которых периодически заходят друг за друга. Но беглый взгляд на рис. 16 показывает, что наблюдаемое смещение имеет величину, предсказываемую теорией Эйнштейна, только тогда, когда источник

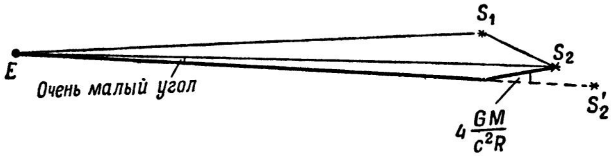


Рис. 16. Луч света, идущий от компоненты S_2 двойной звезды, искривляется, проходя мимо второй компоненты S_1. В этом случае S_1S_2 много меньше, чем ES_1, и угловое смещение S_2 очень мало (ср. с рис. 15).

света расположен очень далеко от источника тяготения, а наблюдатель близок к последнему, иначе смещение будет очень мало.

Радиолокационные эксперименты

Если справедливо утверждение, что на показатель преломления пространства влияет близость Солнца, то можно было бы проверить это, измеряя, сколько времени потребуется лучу радиолокатора, чтобы отразиться от планеты — Меркурия или Венеры. Этот отрезок времени должен в определенной степени зависеть от положения Солнца (эту зависимость нетрудно рассчитать), и если возможны измерения достаточной точности, то можно проверить формулу Эйнштейна для показателя преломления. Сделать такую проверку предложил Шапиро из Массачусетского технологического института. Если прав Эйнштейн, то вблизи Солнца луч радиолокатора должен задерживаться примерно на 200 микросекунд. Такая задержка обнаружима, но на практике нужно учитывать другие источники замедления, такие, как солнечная корона, и неопределенность в наших знаниях о движении планет. Шапиро провел полный анализ и выяснил, что этот эксперимент вполне возможен*.

---

* Shapiro, Physical Review, 145, 1005 (1966). (Эксперименты были проведены группой Шапиро и подтвердили справедливость эйнштейновской формулы с точностью до 10%. Ожидается, что эта точность в ближайшее время будет повышена. — *Перев.*)

Глава 8

ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ В ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ СОЛНЦА

Введение

В этой главе мы познакомимся с экспериментальной проверкой фундаментальной идеи Эйнштейна о том, что поле тяготения само действует как источник тяготения. Нашей лабораторией будет та самая природная система, которая предоставила Ньютону материал, давший ему возможность открыть закон тяготения: движения планет солнечной системы. Движения планет известны с такой высокой точностью, что можно вполне надеяться обнаружить небольшие отклонения от ньютоновых законов. Насколько малы эти отклонения, выяснится чуть позже.

Как мы видели, уравнения Эйнштейна построены так, что в первом приближении они совпадают с ньютоновыми уравнениями. В этом приближении Солнце создает поле, убывающее обратно пропорционально квадрату расстояния от него. Но это поле обладает потенциальной энергией, которая сама по себе является источником тяготения. Это дополнительное поле тяготения в свою очередь действует как дополнительный источник тяготения и т. д. Несмотря на всю сложность ситуации, известно точное поле тяготения Солнца (или, говоря строже, поле тяготения сферически симметричной массы, адекватно воспроизводящей интересующие нас свойства Солнца). Это поле описывается знаменитым шварцшильдовым решением уравнений Эйнштейна. Это решение полностью определяет распространение света и движение материальных тел под действием сферически симметричной массы в той степени, в какой можно пренебречь силой притяжения светом или материальным телом нашей сферически симметричной массы. На практике такое обратное воздействие планет достаточно хорошо описывается ньютоновым приближением. Более того, поле тяготения, создаваемое ньютоновым полем Солнца, настолько мало, что порождаемое им в свою очередь поле оказывается пренебрежимо малым. Самое большее, на что мы можем надеяться, — это обнаружить в движении тел солнечной системы нелинейность первого порядка, требуемую теорией Эйнштейна.

Как скажется эта нелинейность на орбитах планет? Суть дела состоит в том, что источник дополнительного поля тяготения распределен по всему пространству, а не сосредоточен в одной точке, удаленной от планеты. Если бы планета двигалась точно по круговой орбите, то она подвергалась бы действию несколько более сильного поля, которое было бы одним и тем же во всех точках орбиты. Если бы мы не знали о теории Эйнштейна, то просто предположили бы, что масса Солнца чуть больше, чем мы считали. Однако если планета движется по эллиптической орбите, то часть времени она будет находиться в более сильном поле тяготения, а часть — в более слабом. Существенно, что эти изменения величины поля не будут соответствовать закону обратной пропорциональности квадрату расстояния. Эти отклонения от закона обратных квадратов как раз и сказываются на реальной орбите.

Смещение перигелия

Какое влияние будет оказывать это возмущение на орбиту, вычисленную по ньютоновой теории? При ответе на этот вопрос важно помнить, что ньютонова орбита обладает замечательным свойством — каждый последующий виток в точности повторяет предыдущий. Подобное периодическое свойство имеет место еще лишь в одном случае силового взаимодействия — когда сила пропорциональна расстоянию. Если величина силы определяется любыми другими законами, то положение орбиты будет изменяться*. В нашем случае отклонение от закона обратных квадратов очень мало (порядка $[GM/c^2r]\cdot[GM/r^2]$), и, следовательно, можно представить любой оборот вокруг Солнца эллипсом,

* Читатель, знакомый с теорией нормальных колебаний, поймет, что это происходит потому, что для некоторых силовых законов частоты обоих нормальных колебаний, которые определяют движение планеты, равны (вырождены). Таким образом, обе эти частоты остаются в фазе, и планета после каждого периода возвращается в исходную точку — орбита планеты замкнутая. Небольшое отклонение от закона Ньютона снимает вырождение, две моды не совпадают по фазе, и орбита становится незамкнутой.

но этот эллипс будет медленно смещаться в пространстве (рис. 17) в том же направлении, что и сама планета. Можно определить скорость смещения эллипса по движению перигелия — точки орбиты, в которой планета находится ближе всего к Солнцу. По теории Ньютона эта точка неподвижна в пространстве, но эйнштейновское возмущение обусловливает ее медленное обращение вокруг Солнца. При каждом обороте планеты вокруг Солнца перигелий

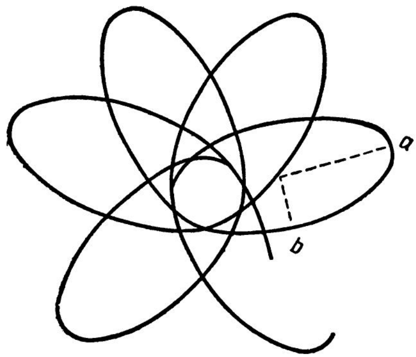


Рис. 17. Орбита планеты, движущейся в шварцшильдовом поле Солнца. Каждое полное обращение происходит по орбите, близкой к эллипсу, но этот эллипс медленно поворачивается, смещая тем самым перигелий планеты. На этом рисунке скорость поворота плоскости орбиты сильно преувеличена.

смещается на $(3GM/c^2b)\cdot(a/b)$ часть длины орбиты* (a — большая, а b — малая полуоси эллипса).

Теперь мы можем сравнить эти расчеты с данными астрономических наблюдений. Во втором столбце табл. 2 приведены предсказанные углы $\delta\theta$ смещений перигелия ближайших к Солнцу планет за сто лет.

Как видно из табл. 2, наибольший эффект ожидается у Меркурия — ближайшей к Солнцу планеты, так как для Меркурия отношение Ma/b^2 самое большое, а период его обращения вокруг Солнца самый короткий. За сто лет Меркурий совершит наибольшее число обращений (420). Но по углу $\delta\theta$ еще нельзя судить о том, сможем ли мы вообще

* Нелинейностью обусловлена только часть этой величины. Остальной вклад связан с наличием в теории Эйнштейна 10 потенциалов, а не одного.

Таблица 2

Планета	$\delta\theta$	$e\delta\theta$	Относительная доступность наблюдений
Меркурий	43″,03	8″,847	2,95
Венера	8,63	0,059	0,03
Земля	3,84	0,064	0,06
Марс	1,35	0,126	0,38
Юпитер	0,06	0,003	?

обнаружить смещение перигелия. Если бы орбита планеты была почти круговой, то определить положение перигелия было бы очень трудно. Мерой точности, с которой можно обнаружить перигелий и его смещение, является степень отклонения истинной орбиты от круговой. Это отклонение измеряется эксцентриситетом эллипса e, определяемым формулой $b^2 = a^2(1-e^2)$. В третьем столбце табл. 2 даны произведения смещений перигелия на эксцентриситет орбит. По счастливой случайности эксцентриситет орбиты Меркурия самый большой, что естественно увеличивает его преимущества.

Однако есть одно обстоятельство, которое усложняет выполнение задачи: не все планеты наблюдаются одинаково легко. Поэтому теряют часть своих преимуществ Меркурий и Венера, расположенные к Солнцу ближе, чем Земля. Когда эти планеты движутся поперек луча зрения, они видны очень близко к Солнцу, и наблюдения их трудны и неточны. Когда же Меркурий и Венера видны далеко от Солнца, направление их движения почти совпадает с лучом зрения, и наблюдения мало что говорят об их положении на орбите. Еще одну трудность создает изменение формы видимого диска планеты, подобное фазам Луны, что затрудняет определение центра тяжести с желаемой точностью. В последнем столбце табл. 2 мы приводим оценки Клеменса для относительной доступности наблюдений движения перигелия планеты.

С первого взгляда ясно, что Меркурий — самая подходящая планета для определения смещения перигелия. Сравнение с наблюдениями осложняется тем, что необходимо учитывать ньютоново гравитационное влияние на движение Меркурия со стороны других планет. Эти возмущения также приводят к отклонениям от точного закона обратных квадратов и к смещению перигелия. Смещение, вычисленное по теории Ньютона, приведено в табл. 3; здесь также учтено отклонение формы Солнца от сферической.

Таблица 3

Возмущающая планета	Возмущение	Ошибка
Венера	277″,856	0″,27
Земля	90,038	0,08
Марс	2,536	0,00
Юпитер	153,584	0,00
Сатурн	7,302	0,01
Уран	0,141	0,00
Нептун	0,042	0,00
Сплюснутость Солнца*	0,010	0,02
Сумма	531,509	0,30

* Степень сплюснутости Солнца определена по наблюдениям его вращения. Недавно Дикке и Голденберг измерили видимую сплюснутость Солнца; если распределение плотности подобно форме Солнца, то соответствующее возмущение составляло бы около 3″,4 за сто лет, нарушая тем самым согласие между наблюдениями и теорией Эйнштейна. Однако до сих пор еще не показано, что распределение плотности обладает такой сплюснутостью, как и видимый диск Солнца К тому же из теории внутреннего строения звезд это вовсе не следует.

Указанные в табл. 3 ошибки обусловлены главным образом неточностями в значениях масс планет, особенно массы Венеры. Массу планеты без спутников можно определить по возмущениям, оказываемым планетой на движение других планет (это можно сделать тогда, когда поправки на теорию Эйнштейна незначительны).

Наблюдаемое смещение перигелия Меркурия, как было найдено в результате наблюдений, произведенных с 1765 по 1937 гг., составляет 574″,10±0″,41. Таким образом, от значения, предсказанного на основании теории Ньютона, эта величина отличается на 42″,56±0″,5. О расхождении такого порядка было хорошо известно уже в XIX в., и для его объяснения предлагались различные теории, но ни одна не стала общепринятой. Теперь мы знаем, что это расхождение прекрасно объясняется теорией Эйнштейна, которая предсказывает дополнительное смещение

43″,03±0″,03. Поскольку значительная часть этого смещения обусловлена нелинейностью теории Эйнштейна, существование этой нелинейности можно считать подтвержденным*.

Следующей по легкости определения смещения перигелия планетой, казалось бы, должен быть Марс, но, к сожалению, ньютонова теория его движения неточна, так что теоретический поворот орбиты планеты просто неясен. В настоящее время эта теория уточняется, но пока никаких окончательных результатов еще не получено.

В этом ряду после Марса идет Земля. Имеются некоторые предварительные данные, свидетельствующие о возможности обнаружения эффекта Эйнштейна. Возмущения от других планет приведены в табл. 4.

Таблица 4

Возмущающая планета	Возмущение	Ошибка
Меркурий	−13″,75	2″,3
Венера	345,49	0,3
Марс	97,69	0,1
Юпитер	696,85	0,0
Сатурн	18,74	0,0
Уран	0,57	0,0
Нептун	0,18	0,0
Сплюснутость Солнца	0,00	0,0
Луна	7,68	0,0
Сумма	1153,45	2,5

Наблюдаемое смещение перигелия Земли равно 1158″,05±0″,8 и, следовательно, отличается от вычисленного по теории Ньютона на 4″,6±2″,7. Это расхождение снова может быть объяснено эйнштейновским смещением, величина которого составляет 3″,84. Однако в этом случае ошибка составляет значительную часть всего эффекта, и, конечно, было бы желательно ее уменьшить. Наибольшую неопределенность вносит неточность значения

* Если только Солнце сплюснуто не более, чем обычно считают (см. примечание к табл. 3).

массы Меркурия, но, вероятно, в ближайшем будущем ошибку в определении массы Меркурия удастся уменьшить вдвое.

Пока никаких других отклонений от теории Ньютона не известно, и, согласно теории Эйнштейна, нельзя ожидать, что обнаружится что-нибудь еще. Был момент, когда возникли сомнения в правильности теории Эйнштейна. Это было связано с наблюдением движения Венеры. Расчеты показывали, что ее орбита отличается от плоской на величину, бо́льшую, чем вычисленная на основе учета возмущений, вызванных другими планетами. Этот эффект не мог быть объяснен теорией Эйнштейна, так как, согласно этой теории, невозмущенное движение планеты должно происходить в плоскости. Однако, как было показано в 1955 г. (эти расчеты были произведены на электронных вычислительных машинах), никаких отклонений от теории Эйнштейна не имело места.

По-видимому, для дальнейшей проверки теории Эйнштейна можно будет использовать искусственные спутники Земли, так как они имеют малый период обращения и, кроме того, им можно задать орбиту с большим эксцентриситетом. К сожалению, очень трудно учесть с достаточной точностью влияние различных возмущающих факторов, в частности влияние атмосферы и неоднородность поля тяготения Земли*.

Следствия точных решений Шварцшильда

В начале этой главы отмечалось, что по орбитам планет можно судить лишь о нелинейности первого порядка в теории Эйнштейна, т. е. о действии поля тяготения, порождаемого в свою очередь ньютоновым полем тяготения Солнца. Это поле в свою очередь порождает поле тяготения и т. д. Для сферически симметричного материального источника известно точное решение, которое в замкнутой форме представляет эту бесконечную иерархию полей во всем пространстве вне источника. Это знаменитое шварц-

* Совсем недавно была найдена с точностью 20% прецессия перигелия астероида Икар, хорошо согласующаяся с теорией Эйнштейна. Будущие наблюдения увеличат точность определения прецессии до 8% [Shapiro, Ash, Smith, Physical Review Letters, 20, 1517 (1968)].

шильдово решение, являющееся одним из немногих точных решений в теории Эйнштейна, описывающих интересные физические явления. Не известно, например, ни одного решения, описывающего гравитационное взаимодействие двух массивных тел. (При определении движения планет предполагается, что планеты имеют незначительные по сравнению с Солнцем массы, когда речь идет об относительных поправках.)

Хотя случай, который мы будем рассматривать, и не имеет практического значения, интересно проанализировать орбиты частиц, которые настолько близко подходят к материальному источнику, что неньютоновы эффекты становятся очень большими. Это должно происходить на таком расстоянии от источника, где величина дроби GM/c^2r почти равна единице. Тогда отклонение первого порядка от теории Ньютона [составляющее примерно $(GM/c^2r)\cdot(GM/r^2)$] становится сравнимым с ньютоновым полем. При этом отклонения более высокого порядка не будут пренебрежимо малы, и необходимо применять точное решение Шварцшильда.

В случае Солнца дробь GM/c^2r равна единице при $r = r_c \approx 0{,}75$ *км*. Точка, отстоящая от центра тяжести Солнца на 0,75 *км*, лежит, конечно, внутри Солнца, где решение Шварцшильда не применимо, так что заметных неньютоновых эффектов не возникает. Быть может, существуют значительно более массивные тела, чем Солнце, которые достаточно компактны и их радиус меньше r_c. Средняя плотность тела радиусом r_c составляет

$$\frac{M}{(4\pi/3)\cdot(GM/c^2)^3}, \quad \text{или} \quad \frac{3c^6}{4\pi G^3M^2}.$$

Для тела с массой, равной массе Солнца, численное значение равно $2\cdot10^{17}$ *г/см*^{3}, что превосходит плотность атомного ядра (10^{15} *г/см*^{3}). Поскольку плотность пропорциональна M^{-2}, тело с массой $10^9 M_\odot$ и со средней плотностью меньше 1 *г/см*^{3} могло бы обнаруживать на поверхности сильные неньютоновы свойства. Хойл и Фаулер предположили, что такие массивные тела существуют и имеют некоторое отношение к мощным источникам радиоволн, происхождение которых все еще является достаточно таинственным (см. ниже).

Поэтому выяснение следствий из теории Эйнштейна для сильных полей тяготения, где теория Ньютона уже неприменима, может иметь определенное практическое значение. Опишем некоторые особенности орбит частиц и поведение световых лучей, проходящих вблизи такого массивного тела. Наиболее поразительный эффект заключается в том, что на некотором критическом расстоянии от центра полностью меняется характер орбит. В этом состоит существенное отличие теории Эйнштейна от теории Ньютона, в которой вид орбиты не зависит от расстояния от центра. Будет ли она окружностью, эллипсом или гиперболой, зависит лишь от скорости. Основная причина такого различия кроется в том, что теория Ньютона (помимо других упрощений) принимает скорость света бесконечной. В этом случае величина GM/c^2 равна нулю, и в теории Ньютона не существует характерной длины, которая помогла бы определить, где именно меняется характер орбиты.

Первое критическое расстояние в теории Эйнштейна равно $4GM/c^2$. Если перигелий расположен ближе этого критического расстояния, то существование орбит эллиптического типа невозможно. В этом случае орбита превращается в спираль, которая с каждым оборотом приближается к центру действия сил, и частица непременно захватывается материальным источником, как бы мал он ни был.

Второе критическое расстояние равно $3GM/c^2$. Любая частица, движущаяся из бесконечности к источнику и подошедшая к нему ближе чем на $3GM/c^2$, непременно будет захвачена им. Это означает, что если попытаться исследовать поле тяготения какого-либо тела методом, аналогичным методу Резерфорда для определения электрического поля ядер при помощи α-частиц, т. е. обстреливая его частицами и изучая траектории рассеянных частиц, то определить поле внутри сферы радиусом $3GM/c^2$ невозможно. Все «снаряды» будут захвачены, и ни один из них не вернется.

Расстояние $3GM/c^2$ является также критическим и для траекторий световых лучей. Рассмотренное в гл. 7 искривление лучей света дает нам пример гиперболической (незамкнутой) орбиты. Но свет может двигаться и по замкнутой орбите; например, он может вечно циркулировать по кругу радиусом $3GM/c^2$. Существуют также орбиты, на которых световые лучи захватываются. Действительно, если свет, идущий из бесконечности, проходит от центра действия сил на расстоянии, меньшем чем $3\sqrt{3}\ GM/c^2$, то он начинает двигаться по закручивающейся спирали и захватывается телом, являющимся источником тяготения. Удивительно, что начиная с $2GM/c^2$ траектории световых лучей оказываются необратимыми. Иными словами, свет, испускаемый в этой области, никогда не выходит за ее пределы и, следовательно, не может быть виден из внешнего пространства. Чтобы показать правдоподобность этих рассуждений, рассмотрим гравитационное красное смещение для неподвижного источника. Точная формула смещения выглядит следующим образом:

$$\frac{\nu'}{\nu} = \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}}.$$

Как мы видим, она отличается от используемой в гл. 5 приближенной формулы, справедливой при $2GM/c^2 r \ll 1$:

$$\frac{\nu'}{\nu} \sim 1 - \frac{GM}{c^2 r}.$$

Из точной формулы следует, что красное смещение $\delta\lambda$ стремится к бесконечности, когда $r = 2GM/c^2$ (для $r < 2GM/c^2$ формула не годится). Значит, источник казался бы бесконечно слабым: другими словами, его излучение не достигает наблюдателя, находящегося вне сферы радиуса $2GM/c^2$. Это критическое расстояние обычно называется *радиусом Шварцшильда*, или *гравитационным* радиусом, массы M.

Наши рассуждения имеют прямое отношение к проблеме гравитационного коллапса больших масс*. Интерес к этой проблеме возобновился после того, как Хойл и Фаулер предположили, что гравитационный коллапс может предшествовать образованию сильных источников космического радиоизлучения. Здесь проблема состоит в том, что в типичных радиоисточниках сосредоточено в форме магнитного поля и быстрых электронов грандиозное количество энергии — в некоторых случаях до 10^{62} *эрг*. Эта энергия эквивалентна $5 \cdot 10^7$ солнечным массам, что приблизительно составляет 1/1000 массы большой галактики. Остается загадкой, каким образом эта энергия выделяется в нужной форме за весьма ограниченное время. Эквивалент-

* Гравитационный коллапс — это быстрое сжатие весьма массивного тела по направлению к своему центру под действием гравитационных сил. — *Прим. перев.*

ные этой энергии весьма значительные массы позволяют сделать предположение о том, что массы, такого порядка или даже еще бо́льшие, должны вести себя в галактиках как единое целое. Хойл и Фаулер допускают, что, если такая масса испытывает как целое гравитационный коллапс, часть выделяющейся гравитационной энергии может перейти в энергию быстрых электронов и магнитного поля.

Еще неясно, имеет ли вообще гравитационный коллапс какое-либо отношение к радиоисточникам, но если выяснится, что имеет, то предсказание эйнштейновской теории займет важное место в астрофизике. Действительно, если тело с большой массой достаточно компактно, то теория Эйнштейна предсказывает, что оно должно сколлапсировать до своего шварцшильдова радиуса и далее вплоть до бесконечного значения плотности. Весь процесс происходит за время порядка $(G\rho)^{-1/2}$, где ρ — начальная плотность (это время составляет около 1 часа для плотности $\rho \sim 1$ *г/см*^{3}). Такая продолжительность гравитационного коллапса была бы измерена наблюдателем, находящимся на коллапсирующем объекте. Этому наблюдателю едва ли стоит завидовать. Однако этот же процесс для внешнего наблюдателя будет длиться бесконечно долго, потому что коллапсирующий объект станет совершенно невидим, как только он достигнет гравитационного радиуса $2GM/c^2$. (Чтобы понять это утверждение, полезно представить себе внешнего наблюдателя, следящего за атомными часами, расположенными на поверхности коллапсирующего объекта, причем показания часов подвержены гравитационному красному смещению.) Реализуются ли в природе эти или какие-либо другие ультрарелятивистские явления, нам доподлинно неизвестно. Однако, если окажется, что они в природе действительно существуют, изучение их открыло бы возможность строгой проверки самых экзотических предсказаний теории Эйнштейна.

Глава 9

КРИВИЗНА ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

Введение

До сих пор мы рассматривали силы инерции и силы тяготения с двух точек зрения: как непосредственное взаимодействие частиц и как взаимодействие через посредство поля. В этой заключительной главе мы рассмотрим третью точку зрения — геометрическую. Ореол таинственности, которым окружена общая теория относительности, вызван отказом от привычной для всех нас евклидовой геометрии. Мы надеемся, что содержание этой главы снимет покров загадочности с теории Эйнштейна.

Обоснованность геометрического подхода сразу станет ясна, если мы вспомним, что говорилось в гл. 1 об абсолютном пространстве Ньютона. Мы указывали, что, с точки зрения Ньютона, силы инерции представляют собой результат действия пространства на вещество. Другими словами, пространство, т. е. его геометрия, играет в динамике активную роль. Далее мы увидим, что, с точки зрения Ньютона, свойства пространства всегда остаются неизменными, т. е. являются абсолютными и независимыми от вещества, находящегося в этом пространстве. Другими словами, согласно Ньютону, обратное воздействие на пространство отсутствует, и, следовательно, находящееся в нем вещество не оказывает на его геометрию никакого влияния.

Но именно несостоятельность этой точки зрения подчеркивалась на протяжении всей книги. Для простоты мы рассматривали появление сил инерции либо при прямом взаимодействии частиц, либо посредством поля. Но при желании мы можем перейти на язык Ньютона и говорить о действии пространства на вещество через посредство сил инерции, если согласиться с тем, что и вещество действует на пространство. Поле, о котором шла речь в гл. 7, можно рассматривать как *способ описания результирующих динамических свойств самого пространства**.

* Читатель, знакомый со специальной теорией относительности, поймет, что, говоря о пространстве, мы имеем в виду пространство-время.

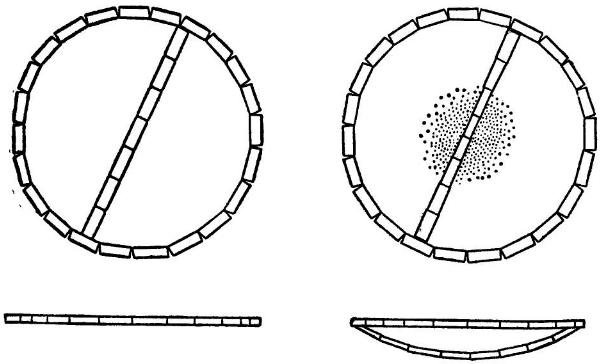
Представим себе, что в какой-то области пространства материальных тел нет. В этом случае поле сил тяготения и поле сил инерции сводятся к одному полю — полю сил инерции. Мы знаем из теории Ньютона, что если в инерциальной системе отсчета поле сил инерции и сил тяготения во всех точках равно нулю, то геометрия пространства евклидова. Очевидно, именно такая геометрия пространства порождается удаленными телами. Но если где-то вблизи находится материальное тело, то неоднородность создаваемого им поля приводит к тому, что нельзя найти такую систему отсчета, в которой силы инерции и силы тяготения всюду будут равны нулю (рис. 9). В этом случае можно сказать, что геометрия пространства уже неевклидова.

Ниже мы объясним, что это значит и какие следствия из этого вытекают. Но начнем мы по-прежнему с некоторой аналогии.

Геометрия нагретого диска

Предположим, что физику требуется металлический диск, и притом строго круглой формы. Чтобы проверить, действительно ли диск круглый, физик должен измерить длину его окружности и радиус и найти их отношение, т. е. выяснить, равно ли это отношение 2π. Он самым тщательным образом проводит измерения, применяя столь маленькую линейку, что длина окружности определяется практически без ошибок (рис. 18, *а*). И естественно, он очень обеспокоен тем, что, несмотря на все предосторожности, полученное им отношение значительно меньше ожидаемого. Он уже собирается писать гневное письмо на завод, но вовремя спохватывается: при измерениях диск находился не в тех условиях, которые оговорены изготовителем. В самом деле, диск был неравномерно освещен солнцем, и его центральная часть, которая находилась в тени, была холоднее чем края. Предположим, что этот диск был сделан из инвара, и, следовательно, его расширение было незначительным. Однако тепло от диска передавалось линейке, которая была сделана не из инвара и, конечно, расширялась от нагревания. Кроме того, это расширение было меньше, когда линейкой измерялся радиус, чем когда измерялась длина окружности. Физик поймет, что неожиданный результат обусловлен изменением длины линейки. Измерив температуру разных частей диска, он внесет необходимые поправки. В конце концов он убедится, что изготовители его не обманули — диск действительно круглый.

Этот пример показывает, что физики-экспериментаторы отнюдь не наивные люди; они вовсе не считают, что измерительные приборы не должны подвергаться проверке и пересмотру. Но что случилось бы, если бы они именно так



а *б*

Рис 18. *а* — измерение длины окружности диска, температура которого повсюду одинакова. В нижней части чертежа показано, что сечение диска плоское. *б*— тот же диск, однако на этот раз температура в центре ниже, чем на краях. Диск остается плоским, но он представляется искривленым, потому что мерные линейки около центра диска укоротились и, чтобы измерить диаметр, требуется большее их количество. Это кажущееся искривление диска означает, что его геометрия, определяемая линейками, уже неевклидова.

считали? Предположим, что физик выбрал свою линейку в качестве эталона, который совершенно не нуждается в проверке. Тогда он непременно обнаружил бы, что отношение длины окружности нагретого диска к его радиусу не равно величине, соответствующей геометрии Евклида. Правда, диск все же был бы круглым в том смысле, что каждая точка на его краю была бы одинаково удалена от центра. Другими словами, в результате измерений физик установил бы, что диск, который представляет собой круг, поскольку все его радиусы равны, — может иметь длину окружности, связанную с радиусом неевклидовым соотношением. Он мог бы выразить этот факт, сказав, что геометрия диска, измеренная его неверной линейкой, является неевклидовой (рис. 18, *б*).

Математики изучают неевклидовы геометрии с середины XIX в., и поэтому в наше время свойства неевклидовых пространств отнюдь не являются загадкой. В частности, мы знаем, как можно выразить математически степень отклонения какой-либо геометрии от геометрии Евклида. В нашем примере с нагретым диском такой величиной является разность между 2π и фактическим отношением длины окружности диска к его радиусу. Важно суметь выразить это отклонение от теории Евклида количественно, ибо тогда мы сможем связать эту величину с распределением температуры по диску. Другими словами, мы обнаруживаем связь между степенью отклонения от геометрии Евклида и физическим состоянием рассматриваемого объекта.

На практике физики предпочитают избегать этой ситуации: всегда можно ввести поправку на тепловое изменение измерительного прибора. Конечно, отчасти они делают это для того, чтобы не изучать неевклидову геометрию. Но имеется и более глубокая причина. Предположим, что физику пришлось бы измерять диск несколькими линейками, сделанными из разных материалов. Линейное расширение этих линеек было бы различным, и, следовательно, каждая из них давала бы разный отсчет. Конечно, физик ввел бы в каждом случае соответствующую поправку и получил бы согласующиеся между собой результаты. Но если бы он не ввел никаких поправок, то обнаружил бы, что степень отклонения от евклидовой геометрии зависит не только от распределения температуры по диску, но также и от материала линейки. Другими словами, геометрия диска была бы не характерным свойством его физического (теплового) состояния, а зависела бы от свойств линейки, которой выполняются измерения. Это настолько неудобно, что вряд ли кто-либо предложит, чтобы физик отказался от своих привычных методов и связался с неевклидовой геометрией.

Мы подошли к центральному моменту нашей аналогии. Права неевклидовой геометрии стали бы куда более вескими, если бы все линейки расширялись одинаково, потому что в этом случае все они оказались бы согласованными эталонами длины независимо от их температур. Следовательно, геометрия диска, определяемая линейками без дополнительных поправок, стала бы собственным свойством диска, зависящим только от распределения температуры по диску, а не от материала линеек. Тогда, пожалуй, имело бы смысл вводить неевклидову геометрию как удобный метод описания состояния диска.

Это рассуждение может показаться весьма далеким от практики, так как известно, что в действительности различные линейки расширяются по-разному. Однако оно

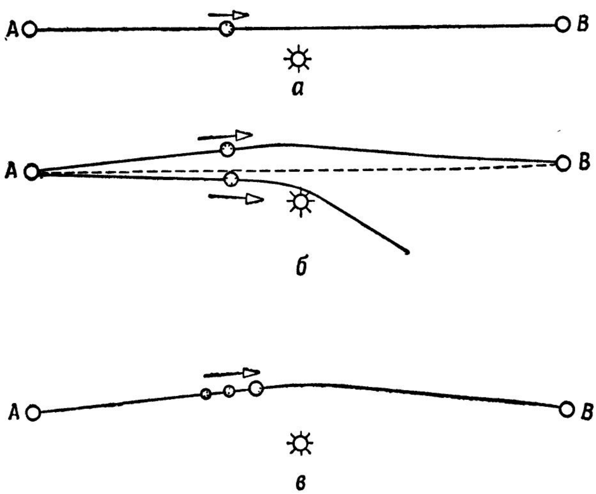


Рис. 19. *а* — траектория движущегося тела, если бы притяжения не было. Расстояние между точками *A* и *B* можно было бы определить, зная время движения тела (с известной скоростью) между точками *A* и *B*. *б* — траектория движущегося тела, если действует тяготение. Время движения тела между точками *A* и *B* уже иное из-за гравитационного действия третьего тела. *в* — тела различной массы движутся по одной и той же траектории. Время перехода между точками *A* и *B* для всех тел одно и то же, поэтому все они дают одно и то же значение расстояния между *A* и *B*

сразу приобретает практический смысл, если перейти к геометрии пространства. В этом случае главным фактором, вносящим изменения в геометрию, будет тяготение, которое изменяет все линейки одинаково. Поскольку линейками измеряются очень малые расстояния, для объяснения этого свойства тяготения мы привлечем более реалистичное измерительное устройство. Расстояние между двумя точками можно определять, измеряя время, необходимое телу, движущемуся с определенной скоростью, чтобы переместиться из одной точки в другую. Чаще всего для этой цели используются свет и радиоволны, но для наглядности удобнее говорить о материальных телах.

Природа гравитационного искажения наших «линеек» очевидна: силы тяготения влияют на движение «измерительных тел» и, следовательно, на время, которое требуется им, чтобы переместиться из одной точки в другую (рис. 19). Один из способов действия в этой ситуации состоит в том, чтобы внести поправку в измеренное время, тем самым учтя влияние тяготения. Тогда полученные расстояния между точками пространства удовлетворяли бы обычным соотношениям евклидовой геометрии.

Однако можно вообще не обращать внимания на влияние поля тяготения на тела и не вносить никаких поправок; тогда геометрия пространства оказалась бы неевклидовой*. Но мы знаем из эксперимента Галилея и из принципа эквивалентности, что силы тяготения действуют на все тела совершенно одинаково (рис. 8). Таким образом, все наши линейки давали бы один и тот же неправильный результат. Это означает, что вклад неевклидовой геометрии оказывается одним и тем же независимо от того, какое тело использовалось для исследования геометрии пространства. Другими словами, геометрия пространства является собственным свойством поля тяготения.

Мы можем продвинуться еще дальше. Вспомним, что силы инерции имеют гравитационное происхождение. Значит, можно ожидать, что при наличии поля сил инерции геометрия пространства ** также становится неевклидовой. Другими словами, в неинерциальной системе отсчета геометрия пространства неевклидова. Чтобы разобраться в этом, рассмотрим геометрию вращающегося диска.

Геометрия вращающегося диска

Представим себе невращающийся диск, центр которого покоится относительно инерциальной системы отсчета. Каждая точка его окружности удалена от центра на одно

---

* См. примечание на стр. 88.

** Читатели понимают, что здесь речь идет о пространстве, а не о пространстве-времени.

и то же расстояние r. В этом случае можно говорить о круглом диске. Согласно евклидовой геометрии, длина его окружности равна $2\pi r$. Теперь предположим, что диск вращается в своей плоскости вокруг центра с угловой скоростью ω относительно инерциальной системы отсчета. Измерим радиус этого диска при помощи стержня, покоящегося относительно диска. Длина этого стержня для невращающегося наблюдателя может зависеть от ускорения и скорости диска.

Мы знаем, что из-за наличия ускорения стержень будет растягиваться (если вращение будет достаточно быстрым, он разрушится вообще). Нам достаточно предположить, что стержень достаточно жесткий, а вращение не очень быстрое, и, значит, стержень практически не растягивается. Влияние скорости совершенно иное; мы знаем из специальной теории относительности, что этот эффект одинаков для всех стержней независимо от того, из чего и как они сделаны. В рассматриваемом случае эффект равен нулю, так как направление скорости стержня перпендикулярно его длине. Можно сделать вывод, что наш жесткий стержень имеет такую же длину, как если бы он находился в покое. Если, кроме того, диск такой же жесткий, как и стержень, то можно пренебречь его расширением, так что радиус диска, измеренный стержнем, покоящимся относительно диска, будет равен r.

Но что можно сказать о длине окружности диска? Мы можем измерить ее с достаточной точностью, взяв большое количество очень маленьких стержней и расположив их вдоль окружности, длину которой нам надо найти. Если эти стержни покоятся относительно вращающегося диска, то наблюдатель, связанный с инерциальной системой отсчета, должен учитывать их скорость и ускорение. Как и раньше, влиянием ускорения можно пренебречь. Однако на этот раз стержни движутся в направлении своей длины с линейной скоростью ωr. Согласно специальной теории относительности, движущийся стержень в $\sqrt{1-(\omega^2 r^2/c^2)}$ раз короче неподвижного. Если сумма собственных длин всех стержней равна l, то инерциальный наблюдатель получит длину окружности $l\sqrt{1-(\omega^2 r^2/c^2)}$. Но для инерциального наблюдателя пространство, конечно, является евклидовым, а вращающийся диск — круглым, так как он имеет постоянный радиус r. Таким образом,

$$l\sqrt{1-\frac{\omega^2r^2}{c^2}}=2\pi r. \qquad (11)$$

Теперь перейдем к неинерциальной системе отсчета, в которой вращающийся диск неподвижен. Чтобы обмерить диск в этой системе отсчета, снова будем пользоваться стержнями, неподвижными относительно этой системы. Как мы видели, расположенный по радиусу стержень имеет одну и ту же длину как во вращающейся, так и в невращающейся системе отсчета (его длина в обоих случаях равна r). Таким образом, каждая точка окружности диска находится на одном и том же расстоянии от центра, и мы можем вполне обоснованно сказать, что диск во вращающейся системе отсчета тоже круглый. Но в этой системе отсчета стержни, лежащие вдоль окружности, неподвижны, и, следовательно, сумма их длин равна l. Из формулы (11) получаем

$$l=\frac{2\pi r}{\sqrt{1-\frac{\omega^2r^2}{c^2}}}.$$

Следовательно, длина окружности и радиус круглого диска не подчиняются соотношению геометрии Евклида. Другими словами, *геометрия диска неевклидова.* Поскольку мы имеем дело с неинерциальной системой, это является следствием наличия сил инерции. Таким образом, силы инерции заставляют геометрию пространства* отклоняться от евклидовой, причем величина этого отклонения (измеряемая множителем $1/\sqrt{1-(\omega^2r^2/c^2)}$) определяется величиной сил инерции (в данном случае величиной центробежной силы ω^2r).

Теперь нам надо подумать над одним серьезным возражением, которое может возникнуть в связи с утверждением, что силы инерции делают геометрию пространства неевклидовой. Нам могут сказать, что силы инерции влияют на измерительные приборы, и если внести поправку на это влияние, то истинная геометрия пространства останется

* Тот, кто ближе знаком с этими вопросами, понимает, что здесь мы по-прежнему имеем в виду именно пространство, а не пространство-время.

евклидовой. Нет, конечно, сомнения в том, что физики вносят в свои измерения поправки, обусловленные температурными градиентами, электрическими и магнитными полями и т. д., прежде чем получить «истинные» результаты. Однако в этих случаях поправки зависят не только от силы и характера возмущающих факторов, но также, как отмечалось ранее, и от особенностей используемого измерительного прибора. Только в случае поля сил инерции возмущение является универсальным, т. е. одним и тем же для всех измерительных приборов. Таким образом, если приписать это возмущение геометрии, а не измерительному прибору, то мы придем к выводу, что геометрия остается неизменной, какие бы приборы мы ни использовали для ее определения. Оказывается, что это удобный путь описания физической ситуации.

Картина остается в точности той же самой, если вместо сил инерции рассмотреть силы тяготения. Согласно принципу эквивалентности, мы предполагаем, что поле тяготения, порождаемое, скажем, близлежащим телом, искривляет все наши измерительные приборы одинаково. Тогда определяемая ими геометрия пространства будет неевклидовой, но она не зависит от того, какой именно прибор используется (ср. стр. 93). В следующем разделе мы увидим, как найти степень отклонения от геометрии Евклида. Здесь же нам хочется указать еще одно преимущество предположения о том, что влияние полей сил тяготения и сил инерции должно сводиться к искривлению геометрии пространства. Эйнштейновские уравнения поля в этом случае просто устанавливают связь между степенью искривления и источниками полей, т. е. инерцией вещества. Но мы помним, что эти уравнения определяют также поведение вещества в поле сил тяготения и инерции. Согласно принятой нами терминологии, можно сказать, что эти уравнения определяют поведение вещества в искривленном пространстве. Далее, измерительные инструменты сами состоят из вещества, значит, их поведение также определяется уравнениями поля. Таким образом, уравнения поля играют двойную роль:

а) определяют геометрию пространства, обусловленную данным распределением вещества;

б) гарантируют, что геометрия пространства, измеряемая посредством этого вещества, будет такой же, как геометрия, определяемая этим веществом.

Кривизна и неевклидова геометрия

Наша последняя задача состоит в том, чтобы математически оценить степень отклонения от евклидовой геометрии. Решить эту задачу в случае трехмерного пространства было бы чрезвычайно сложно; если же ограничиться двумерным пространством, то задача существенно упрощается. Нам уже приходилось сталкиваться со случаем двумерной неевклидовой геометрии: вращающийся диск, длина окружности которого не равна радиусу, умноженному на 2π. В этом случае мы установили степень отклонения геометрии от евклидовой, выразив ее через некоторую разность. Однако обычно используется несколько иной метод, к описанию которого мы сейчас и переходим.

Рассмотрим сначала поверхность сферы. Геометрии этой поверхности можно придать неевклидову интерпретацию. Например, кратчайшее расстояние между двумя точками поверхности сферы представляет собой дугу большого круга, проведенную через эти точки * (рис. 20, *а*). Таким образом, дуга большого круга является аналогом прямой линии на плоскости. Треугольник, образованный дугами трех больших кругов, является аналогом треугольника на плоскости (рис. 20, *б*). Сумма углов такого сферического треугольника превышает 180°, т. е. сумму углов плоского треугольника. Величина этого превышения является мерой отклонения от геометрии Евклида, причем она тем больше, чем меньше радиус сферы, т. е. чем сильнее отклонение поверхности от плоскости. Гаусс установил, что в пределе при стремлении к нулю площади сферического треугольника это превышение равно площади треугольника, умноженной на кривизну сферической поверхности**. Таким образом, кривизна является мерой отклонения от евклидовой геометрии.

Понять, что означает искривление двумерной поверхности, очень легко, так как мы можем представить себе эту поверхность в трехмерном евклидовом пространстве. Совершенно очевидно и значение слова «кривизна». Но когда говорят о кривизне трехмерного неевклидова пространства***, это звучит довольно загадочно. Важно пом-

---

* Радиус большого круга на сфере равен радиусу сферы.

** Кривизна сферической поверхности — величина, обратно пропорциональная квадрату радиуса.

*** Не говоря уже о четырехмерном пространстве-времени.

нить, что кривизна поверхности сферы является собственным свойством поверхности. Это свойство не зависит от того, что сферу можно представить в трехмерном евклидовом пространстве. Двумерное насекомое, помещенное на поверхность сферы, смогло бы обнаружить, что поверхность искривлена, найдя сумму углов сферического

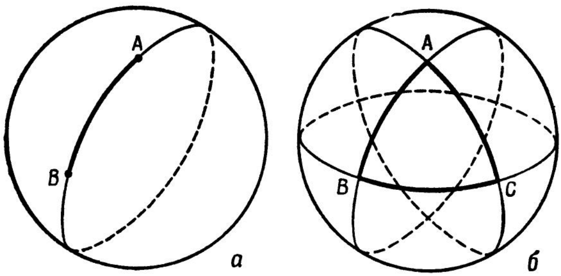


Рис. 20. Прямая линия и треугольник на поверхности сферы. *а* — кратчайшее расстояние между двумя точками на поверхности сферы есть дуга большого круга, проведенная через эти точки. Она аналогична прямой на плоскости *б* — сферический треугольник

треугольника. Точно так же и кривизна трехмерного пространства является присущим ему свойством, которое можно обнаружить путем измерений в этом пространстве. В е что подразумевается под релятивистской кривизной пространства, это то, что тяготение оказывает влияние на движение тел и что если мы не учитываем этого влияния, то геометрия пространства, измеренная при помощи таких тел, становится неевклидовой. Эта точка зрения особенно привлекательна потому, что вклад неевклидовой геометрии, т. е. кривизна, не зависит от тел, при помощи которых она измерялась.

Наш пример со сферой в некоторых отношениях слишком упрощен. В частности, сфера имеет во всех точках одинаковую кривизну, тогда как нетрудно представить себе поверхность с переменной кривизной. Кроме того, кривизна сферы считается положительной, а некоторые поверхности имеют отрицательную кривизну*. К ним относятся седлообразные поверхности, например гиперболоид, полученный вращением гиперболы вокруг ее оси. Но главное упрощение заключается в том, что кривизна двумерной поверхности описывается в каждой точке только одной величиной, тогда как, чтобы определить кривизну трехмерного пространства, необходимо 6 величин, а для четырехмерного пространства-времени — 20 величин. Математическое описание этих случаев довольно сложно, хотя и не очень трудно для понимания.

Уравнения поля Эйнштейна в геометрической форме

Мы видели, что на геометрическом языке эйнштейновские уравнения поля связывают степень отклонения геометрии пространства от геометрии Евклида с инертными свойствами вещества (источников). Другими словами, они устанавливают связь между кривизной пространства и источниками тяготения. Мы не можем объяснить здесь, как это сделал сам Эйнштейн, из-за сложного математического аппарата, которого нам здесь приходится избегать. Достаточно сказать, что он получил те же самые (нелинейные) уравнения, о которых мы говорили в гл. 6. Стоит подчеркнуть, что первоначально эти уравнения были выведены именно геометрическим путем; интерпретация уравнений с точки зрения поля и частиц была разработана позднее, чтобы выявить физический смысл теории.

Теперь, естественно, возникает вопрос, какой из трех подходов лучше: с точки зрения теории поля, с точки зрения частиц или же геометрический? Ответ на этот вопрос зависит от того, какая проблема рассматривается. Если нас интересует проблема инерции, то удобнее всего подход с точки зрения частиц. Для чисто физического описания поведения локальных гравитационных явлений самым подходящим является подход теории поля. Геометрическая

---

* Рассмотренный выше вращающийся диск имеет в связанной с ним покоящейся системе отсчета отрицательную кривизну $\left(\frac{\text{Длина окружности}}{\text{Радиус}} > 2\pi\right)$; нагретый диск, напротив, имеет положительную кривизну $\left(\frac{\text{Длина окружности}}{\text{Радиус}} < 2\pi\right)$.

точка зрения дает большие преимущества при строгом анализе выводов эйнштейновской теории. Изящество, математическая согласованность и большие возможности обусловливают необходимость применения этого метода в фундаментальных исследованиях. Но специалисту по общей теории относительности, конечно, приходится пользоваться всеми тремя методами.

ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ЧТЕНИЯ*

Специальная теория относительности

Г. Бонди, Относительность и здравый смысл, изд-во «Мир», М., 1967.

Сиама — ученик Бонди, и часто упоминаемая в тексте книга Бонди очень близка по своему духу к изложению этой книги.

Э. Тейлор, Дж. Уилер, Физика пространства-времени, изд-во «Мир», М., 1969.

Геометрическое изложение специальной теории относительности. Труднее, чем книга Бонди.

А. Эйнштейн, Л. Инфельд, Эволюция физики, 3-е изд., изд-во «Наука», М., 1965.

В собрании научных трудов Эйнштейна помещена в т. IV на стр. 357 (изд-во «Наука», 1967.)

Общая теория относительности

П. Бергман, Загадка гравитации, изд-во «Наука», М., 1969. Эта книга излагает общую теорию относительности достаточно подробно, избегая, однако, использования математического аппарата.

К. Ланцош, Альберт Эйнштейн и строение космоса, изд-во «Наука», М., 1967.

Сравнительно элементарное изложение специальной и общей теории относительности.

В. Л. Гинзбург, Современная астрофизика (научно-популярные статьи), изд-во «Наука», М., 1970.

Многие вопросы, лишь слегка затронутые в книге Д. Сиамы, изложены подробнее. Приводятся современные экспериментальные данные.

В. Л. Гинзбург, Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными, Успехи физ. наук, **103**, 87 (1971).

Третий раздел этой статьи (Астрофизика) начинается с обсуждения современных проблем общей теории относительности.

* Составлена переводчиком.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Д. Сиама

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Редактор М. Я. Рутковская
Художник Э. Л. Эрман
Художественный редактор В. М. Варлашин
Технический редактор Е. Н. Лебедева
Корректор В. Н. Бедель

Сдано в набор 17/XI 1970 г.
Подписано к печати 29/I 1971 г.
Бумага № 3. $84 \times 108^1/_{32}$ =1,63 бум. л.
5,46 печ. л.
Уч.-изд. л. 4,68. Изд. № 27/5895.
Цена 23 коп. Зак. 1470.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ярославский полиграфкомбинат Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Ярославль, ул. Свободы, 97.

ГОТОВЯТСЯ К ИЗДАНИЮ В 1971 г.
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЕ КНИГИ

П. Вуд, Метеориты и происхождение солнечной системы, перевод с английского.

Океан, сборник статей, перевод с английского.

С. Толанский, Революция в оптике, перевод с английского.

Заказы направляйте в местные книготорги