

Но даже принимая во внимание все эти соображения, Эйнштейн обнаружил, что он может построить несколько различных теорий, которые в равной степени удовлетворяют всем требованиям. Из этих теорий вытекало наличие некоторых эффектов, величина которых была различной для разных теорий, однако сами эти эффекты были настолько малы, что в первом десятилетии двадцатого века не было никаких надежд сделать выбор между этими теориями на основе экспериментальных исследований или данных наблюдений. Требовалась несколько иная точка зрения, чтобы однозначно прийти к релятивистской теории тяготения. Эйнштейн нашел такую новую точку зрения в принципе эквивалентности (см. п. 1), согласно которому ускорение, приобретаемое телом в поле сил тяготения, не зависит от характеристик этого тела.

9. Относительность свободного падения

Как в ньютоновской физике, так и в специальной теории относительности, постулируется существование инерциальных систем отсчета. Повторим, что значит инерциальная система. *Инерциальная система отсчета* — это такая система отсчета, относительно которой тела движутся равномерно и прямолинейно (т. е. без ускорения), когда на них не действуют внешние силы. Экспериментальное нахождение такой инерциальной системы зависит от того, сможем ли мы поставить некоторые тела (пробные тела, как говорят) в такие условия, когда на них не действуют никакие внешние силы, причем должно быть экспериментальное подтверждение отсутствия таких сил. Но как можно достичь такого состояния, в котором внешних сил нет? Обычный ответ состоит в том, что пробное тело следует отвести на достаточное расстояние от всех других тел, которые могут быть источниками сил, поскольку известно, что все силы убывают и стремятся к нулю на достаточном удалении от источника сил.

Следовательно, взглянув на окружение пробного объекта, можно выяснить, есть ли поблизости от него возможные источники внешних сил. Но возможность осмотра зависит от наличия оптических или каких-то иных инструментов, позволяющих просматривать значительные части пространства. Было бы желательно выяснить, существуют ли такие процедуры, с помощью которых можно установить

отсутствие сил, причем очень важно, чтобы эти процедуры по своему характеру были локальными, т. е. осуществлялись в данной области, и чтобы они непосредственно опирались на наблюдение поведения самих пробных тел. Такие процедуры оказываются вполне осуществимыми, если воспользоваться набором пробных тел с различными характеристиками. Допустим, например, что кто-то хочет убедиться в отсутствии электрического поля в некоторой области пространства. Пусть в его распоряжении имеются несколько подходящих пробных тел, часть из которых заряжена положительно, а часть отрицательно, а некоторые тела нейтральны. Тогда можно говорить об отсутствии электрического поля в том случае, если окажется, что все эти различные пробные тела ускоряются одинаковым образом относительно произвольно выбранной (и вовсе не обязательно инерциальной) системы отсчета. Если бы существовало электрическое поле, силы, действующие на положительно заряженные тела, были бы направлены в противоположную сторону по отношению к силам, действующим на отрицательно заряженные тела. Аналогичные процедуры можно предложить для выяснения наличия других видов силовых полей.

Однако такой прием неприемлем, когда нам нужно исключить гравитационные поля. Пропорциональность инертной и тяжелой масс у всех существующих физических объектов приводит к тому, что любой набор пробных частиц будет обнаруживать совершенно одинаковое ускорение в любом гравитационном поле, независимо от того, сильное оно или слабое. Но как можно тогда установить, что существует поле тяготения, такое, например, как поле, создаваемое массивным Солнцем? Кеплер и Ньютон отвечали на этот вопрос так: найдите ускорение всех планет, включая и Землю, направленное к Солнцу (рис. 38). Отдельные планеты ускоряются относительно друг друга и относительно далеких неподвижных звезд, потому что в любой момент времени они находятся на разных расстояниях и в различных направлениях от Солнца. Различие в их ускорениях соответствует разнице в поле тяготения в тех точках, где они оказываются. Два небесных тела, находящихся в непосредственной близости друг от друга (например, планеты и их спутники), падают на Солнце как единое целое; большая часть разницы в их

ускорении относительно друг друга возникает за счет их взаимного гравитационного притяжения. Векторы a и c на рис. 39 представляют соответственно ускорения, которые испытывали бы планета и Луна, если бы они не оказывали никакого влияния друг на друга; векторы d и e описывают ускорение, возникающее из-за их взаимного притяжения, без учета влияния Солнца: векторы b и f

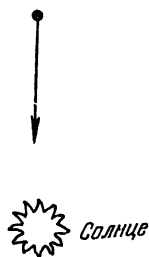


Рис. 38. Гравитационное ускорение, испытываемое двумя планетами.

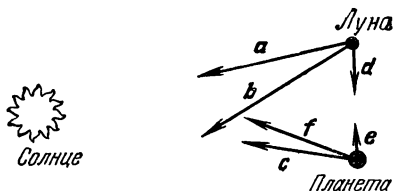


Рис. 39. Планета и Луна.

дают их фактические ускорения с учетом взаимодействия всех трех тел.

Подводя итоги, можно сказать, что если наличие электрического (или любого другого силового) поля может быть обнаружено по различию в действии, которое эти поля оказывают на различные пробные частицы, даже помещенные в одну и ту же точку пространства, все пробные частицы, помещенные в одно и то же поле тяготения, приобретают одно и то же ускорение. Локальными экспериментами, в которых не используются наблюдения далеких звезд, наличие гравитационного поля может быть установлено только в случае его неоднородности; такая неоднородность приводит к различию в ускорениях пробных частиц, помещенных в различные участки поля.

Когда гравитационного поля нет, инерциальная система отсчета может быть построена на основе экспериментов, проводимых локально; необходимо, конечно, чтобы экспериментатор имел под рукой разнообразные пробные частицы, о свойствах которых он имел бы достаточное представление. При наличии гравитационного поля все пробные частицы испытывают одно и то же гравитацион-

ное ускорение; следовательно, такое ускорение может быть обнаружено только сопоставлением объектов, находящихся в различных точках пространства. Для его выявления недостаточно сравнить поведение различных пробных частиц в одном и том же месте. По этой причине астрономы строят инерциальные системы отсчета, которые необходимы им для изучения динамики солнечной системы или галактики, используя внешние объекты, такие, например, как удаленные галактики.

Но даже при наличии гравитационного поля существует некоторый класс систем отсчета, который может быть выделен чисто локальными экспериментами. Так как все гравитационные ускорения в данной точке (малой области) у всех тел одни и те же как по величине, так и по направлению, все они окажутся равными нулю по отношению к системе отсчета, которая ускоряется вместе с другими физическими объектами, которые находятся под действием только силы тяготения. Такая система отсчета называется *свободно падающей системой отсчета*. Свободно падающая система отсчета отличается от всех систем отсчета, рассмотренных до сих пор, тем, что ее нельзя неограниченно продолжить на все пространство и на все моменты времени. Она может быть однозначно определена лишь в окрестности мировой точки, в ограниченной области пространства и для ограниченного промежутка времени. В силу неоднородности всех гравитационных полей любая попытка расширить использование системы отсчета свободного падения на большие расстояния или длительные промежутки времени неизбежно должна столкнуться с внутренними противоречиями. Если система отсчета продолжена жесткими стержнями, гравитационные ускорения, отсчитываемые относительно стержней, будут заметны на достаточных удалениях от той области, где система была подлинно свободно падающей системой отсчета. Если всем составным частям системы отсчета предоставить возможность свободного падения, расстояния между ними с течением времени начнут изменяться.

Систему отсчета, которую нельзя распространить за пределы небольшой области и которая годится только на малый промежуток времени, можно назвать *локальной системой отсчета*. Свободно падающие системы отсчета в этом смысле являются локальными. По отношению к свободно падающим системам отсчета материальные тела, на

которые не действуют никакие силы, кроме сил тяготения, не испытывают ускорения.

Свободно падающие системы отсчета в отсутствие гравитационных полей тождественны с инерциальными системами отсчета; в этом случае они, конечно, неограниченно продолжимы. Но такое неограниченное распространение таких систем становится невозможным, когда появляются гравитационные поля. То, что свободно падающие системы вообще существуют хотя бы только как локальные системы отсчета, есть прямое следствие принципа эквивалентности, которому подчиняются все гравитационные эффекты. Но тот же самый принцип ответствен за то, что никакими локальными процедурами невозможно построить инерциальные системы отсчета при наличии гравитационных полей.

Эйнштейн рассматривал принцип эквивалентности как самое фундаментальное свойство тяготения. Он понял, что от представления о неограниченно продолжимых инерциальных системах отсчета следует отказаться в пользу локальных свободно падающих систем отсчета; и лишь поступив таким образом, можно принять принцип эквивалентности как составную часть фундамента всей физики. Но уже такой подход сам по себе дал возможность физикам глубже заглянуть в природу тяготения. Наличие гравитационных полей оказывается равносильным невозможности распространения в пространстве и времени локальной свободно падающей системы отсчета; таким образом, при изучении гравитационных полей следует фокусировать внимание не столько на локальной величине поля (которое всегда можно уничтожить при переходе к свободно падающей системе отсчета), сколько на неоднородности гравитационных полей. Ценность такого подхода, который в конечном счете отрицает универсальность существования инерциальных систем отсчета, состоит в том, что он ясно показывает следующее: нет никаких оснований принимать без размышлений возможность построения инерциальных систем отсчета, несмотря на то, что такие системы использовались на протяжении нескольких столетий.

Чтобы раздвинуть границы применимости инерциальной системы отсчета в пространстве и времени, нужно уметь сравнивать достаточно удаленные часы друг с другом и передвигать прямолинейные стержни определенной длины в отдаленные участки тех областей, кото-

рые подлежат исследованию. Чтобы установить, действительно ли синхронизованы часы и действительно ли стержни имеют форму прямой линии, в конечном счете требуются световые сигналы и другие формы электромагнитного излучения, как универсально возможные и надежные передатчики информации. В пустом пространстве свет распространяется с постоянной скоростью c и по прямым линиям. Сохранится ли эта картина при наличии гравитационного поля?

Свет несет с собой энергию; следовательно, он обладает массой. В поле тяготения он должен испытывать ускорение. Конечно, ускорение частицы зависит от того, как она движется в данный момент. Если ускорение происходит в направлении скорости, при больших скоростях частицы оно должно быть небольшим, поскольку скорость любой частицы всегда должна остаться меньше, чем скорость света. Согласно специальной теории относительности ускорение любого объекта в направлении движения, если скорость этого объекта достигла скорости света, равно нулю. Но если сила тяготения действует под прямым углом к направлению движения частицы, траектория движения частицы становится искривленной. Кривизну траектории можно оценить, исходя из предположения (и расширения толкования принципа эквивалентности) о том, что траектория, по которой движется свет, представляется свободно падающему наблюдателю в виде прямой. Самое главное в этой аргументации состоит в том, что если гравитация искривляет траекторию света, то обычная процедура построения достаточно протяженной инерциальной системы отсчета уже непригодна.

Однако нельзя ли подправить эту процедуру так, чтобы скомпенсировать гравитационное искривление траектории света? Если считать принцип эквивалентности справедливым, никакие эксперименты по сравнению искривленной траектории света с некоторой прямолинейной траекторией не могут указать нужные поправки. Любой сигнал, распространяющийся со скоростью c в том же направлении, будет идти по такой же траектории; любая частица, движущаяся с меньшей скоростью, описывает еще более искривленную траекторию. Соответственно этому необходимые коррективы в лучшем случае могли быть внесены на основе достаточно полной теории гравитации; построение инерциальной системы

отсчета должно скорее идти вслед за построением такой теории, а не предшествовать ей.

Фактические наблюдения искривления световых лучей в поле тяготения солнца были осуществлены с помощью довольно хитрой уловки; эта уловка опиралась на кажущееся постоянство положения далеких неподвижных звезд. Во время полного солнечного затмения можно получить фотографии всех звезд, окружающих затемненную часть Солнца, поскольку при покрытии Солнца Луной свет, испускаемый Солнцем, уже не мешает наблюдению более слабых объектов. Если сравнить фотографии, полученные во время солнечного затмения, с фотографией той же части неба, сделанной ночью, то окажется, что звезды, наиболее близкие к краю Солнца, во время затмения несколько смещены, причем величина смещения обратно пропорциональна расстоянию изображения звезды от Солнца. Смещение изображения звезд непосредственно у края Солнца составляет 1,75 угловой секунды. Такие наблюдения с переменным успехом проводились чуть ли не во время всех полных солнечных затмений, начиная с 1919 г. Когда атмосферные условия оказывались благоприятными и наблюдения удавалось провести, результаты наблюдений были в согласии с предсказаниями общей теории относительности.

Хотя до того, как были высказаны предположения Эйнштейна, существование инерциальных систем отсчета считалось несомненным, время от времени для удобства применялись также и неинерциальные системы. Такая неинерциальная система может быть, например, связана с вращающейся платформой. Те, кому никогда не приходилось удерживать равновесие на вращающейся платформе (такую платформу представляет собой распространенный аттракцион «чертово колесо»), тем не менее должны знать, что они постоянно находятся на вращающемся теле, которым является наша Земля. Любая система отсчета связанная со стенами нашей земной лаборатории, не может быть инерциальной, поскольку она участвует во вращении Земли относительно своей оси. Это вращение проявляется, в частности, в том, что плоскость качаний маятника медленно поворачивается относительно Земли со скоростью, зависящей от географической широты, на которой расположена лаборатория.

Маятник, с помощью которого можно обнаружить вращение Земли, называется *маятником Фуко*. (Маятник Фуко установлен, например, в Исаакиевском соборе в Ленинграде). Другое явление, которое можно наблюдать во вращающейся системе отсчета, состоит в том, что объекты, находящиеся в начальный момент времени в покое относительно этой системы, начинают затем ускоряться в направлении от оси вращения; такое ускорение называется *центробежным ускорением*.

Ускорения, возникающие только в силу выбора неинерциальной системы отсчета, называют обычно инерциальными ускорениями. Инерциальные ускорения не зависят от физических характеристик пробных тел, с помощью которых производятся наблюдения, поскольку эти ускорения только отражают ту степень, в которой избранная система отсчета отклоняется от инерциальной, и зависят, самое большее, от начального состояния движения каждого пробного тела. В этом отношении инерциальное ускорение напоминает ускорение силы тяжести, которое, согласно принципу эквивалентности, также одинаково в данной точке пространства для всех свободно падающих тел. В свободно падающей системе отсчета нельзя наблюдать ни инерциальных ускорений, ни ускорений тяготения (гравитационных ускорений).

Случилось так, что последовательность этих аргументов была приведена в обратном порядке, и принцип эквивалентности был высказан в форме утверждения о том, что с помощью локальных экспериментов невозможно отличить инерциальное и гравитационное ускорения. Отсюда равенство тяжелой и инертной масс вытекало уже как следствие.

Кабина спутника при выключенных двигателях находится в состоянии свободного падения, и система отсчета, связанная с ней,— это свободно падающая система отсчета. Следовательно, космонавт внутри кабины не ощущает силы тяжести, несмотря на то, что кабина находится в области действия достаточно сильного гравитационного поля Земли. Вообще говоря, свободно падающая система отсчета, в которой не ощущается присутствия гравитационного поля, неотличима от инерциальной системы отсчета, в которой на самом деле гравитационных сил нет; различие между ними состоит только в том, что инерциальные системы могут быть распро-

странены на большие расстояния и промежутки времени, а свободно падающие системы отсчета являются чисто локальными. Обратно, наличие гравитационного поля вызывает такие явления в инерциальной системе отсчета, которые локально неотличимы от инерциального ускорения, которое можно было бы наблюдать в неинерциальной системе отсчета. Следовательно, существование инерциальных систем отсчета в нашей Вселенной, наполненной тяготеющими массами, должно быть выведено из комплекса экспериментальных процедур, которые могут быть основаны на использовании хорошо видимых, но достаточно удаленных объектов, не испытывающих ускорения, процедур, которые, кроме того, компенсируют искривление световых лучей, неизбежное при наличии больших масс.

По всей вероятности, такая экспериментальная программа в принципе неосуществима. Процедуры, предназначенные для выявления инерциальной системы отсчета в неограниченной области пространства и на неограниченно длительный промежуток времени, далеко не однозначны, причем не видно способов сделать их однозначными. Вместе с тем такая неоднозначность приводит к столь незначительной разнице в результатах, что в практической астрономии все эти различия перекрываются обычными ошибками наблюдений.

Эйнштейн высказался за отказ от любых попыток восстановить прежнюю роль инерциальных систем отсчета. Локально их роль должна быть передана свободно падающим системам отсчета; однако эти системы нельзя неограниченно продолжать. Среди систем отсчета, которые допускают продолжение, не может быть никакой иерархии; не существует критерия для выделения класса специальных или привилегированных систем отсчета. Все системы отсчета следует рассматривать как равноправные.

10. Принцип общей ковариантности

На языке четырехмерной геометрии система отсчета представляет собой (*четырёхмерную координатную систему*). Согласно Эйнштейну для формулирования законов природы геометрию пространства-времени вовсе не обязательно связывать с выбором специального класса