

дически изменяться и притом с периодом в одни сутки. В результате возникли бы вынужденные колебания коромысла с таким же периодом, которые можно было бы обнаружить с помощью чувствительной аппаратуры. На фоне неизбежных случайных толчков, которым подвержена система, такие колебания обнаружены не были. Отсюда следует, что в пределах ошибок измерений $\alpha_1 = \alpha_2$, т. е. соблюдается закон эквивалентности.

6. Опыт Дикке был повторен в усовершенствованном виде В. Б. Брагинским и В. И. Пановым в 1971 году. Вместо одного коромысла применялся крутильный маятник, эквивалентный четырем коромыслам, соединенным вместе, как указано на рис. 195, б. Точность опыта была повышена примерно еще в 30 раз. Сравнивались платина и алюминий. Равенство коэффициентов пропорциональности между гравитационной и инертной массами для этих веществ было подтверждено с относительной точностью 10^{-12} . Это то же самое, как если бы мы взвесили корабль водоизмещением в десять тысяч тонн вместе с грузом с точностью до одной сотой грамма.

7. Дорелятивистская физика не придавала существенного значения равенству инертной и гравитационной масс, рассматривая это равенство как случайное совпадение. Основополагающее значение закона эквивалентности инертной и гравитационной масс было понято Эйнштейном. Закон эквивалентности послужил для Эйнштейна отправным пунктом при построении *общей теории относительности*, называемой иначе *релятивистской теорией гравитации*. Этот закон является главным опытным фактом, на котором основана общая теория относительности. Последняя была бы неверна и от нее следовало бы отказаться, если бы было обнаружено малейшее нарушение закона эквивалентности инертной и гравитационной масс. Вот почему повышение и без того исключительной точности, с которой проверяется этот закон, имеет важное принципиальное значение, а не является просто спортивным увлечением с целью побития рекорда и установления нового.

§ 71. Принцип эквивалентности гравитационных сил и сил инерции

1. Мы уже неоднократно отмечали, что все тела, независимо от их масс и химического состава, получают в данном гравитационном поле одинаковые ускорения. Поэтому в таком поле они движутся совершенно одинаково, если только одинаковы начальные условия. Тем же свойством обладают свободно движущиеся тела, если их движение рассматривать относительно какой-либо неинерциальной системы отсчета. Иначе говоря, указанным свойством обладают также силы инерции. Эта аналогия между силами тяготения и силами инерции явилась отправной точкой при построении общей

теории относительности, или релятивистской теории гравитации, Эйнштейна.

Рассмотрим по примеру Эйнштейна, что происходит в движущемся лифте. Допустим сначала, что лифт неподвижно висит на тросе или движется равномерно относительно Земли. Все тела в лифте подвергаются действию земного поля тяготения. Пассажир в лифте ощущает вес собственного тела, оказывает давление на пол лифта, подвергается со стороны пола равному и противоположно направленному противодействию. Груз, подвешенный на пружине, растягивает ее силою своего веса. Все тела, предоставленные самим себе, свободно падают относительно лифта с одним и тем же ускорением g и т. д.

Вообразим теперь, что лифт настолько удален от Земли и прочих небесных тел, что он практически не подвергается с их стороны никаким гравитационным воздействиям. Пусть кто-то тянет за трос лифта, сообщая последнему постоянное ускорение $a = -g$. Гравитационного поля в лифте нет, зато есть сила инерции $-ma = mg$. Под действием таких сил все тела в лифте, если их ничем не удерживать, начнут «падать» с прежним ускорением g . Груз, подвешенный на пружине, растянет ее, как если бы он обладал весом mg . Пассажир в лифте будет оказывать на пол такое же давление, как и в предыдущем случае. Короче говоря, *все механические явления и движения в лифте будут в точности такими же, что и в неподвижном лифте, висящем в поле тяжести*. Эйнштейн распространил это утверждение не только на механические, но и на любые *физические явления*, как это он сделал также с галилеевским принципом относительности. Для такой гипотезы имеются веские основания. *В природе нет чисто механических явлений*. В основе каждого «механического» явления лежит громадное множество разнообразных *других явлений*, относящихся к различным разделам физики. Так, столкновение бильярдных шаров обычно рассматривают как типично механическое явление. Но существование самих шаров и их внутренняя структура определяются *квантовыми законами*, а упругие силы, развивающиеся во время столкновения, сводятся к силам *электростатического взаимодействия* заряженных частиц, из которых построены тела.

Итак, *все физические явления в равномерно ускоренном лифте будут происходить в точности так же, как и в неподвижном лифте, висящем в однородном поле тяжести*. Между тем дорелятивистская физика рассматривала оба случая как существенно разные. В первом случае явления объяснялись действием гравитационного поля, во втором — действием сил инерции. В первом случае лифт является инерциальной системой отсчета, в которой есть однородное поле тяготения. Во втором случае поля тяготения нет, зато есть силы инерции, так как лифт является неинерциальной системой отсчета.

Если лифт в однородном поле тяжести движется вверх или вниз с ускорением a , то на тело в лифте действует сила тяжести mg и сила инерции $-ma$. Результирующая сила $m(g - a)$ состоит из этих двух слагаемых, совершенно различных по своей физической природе. Между тем все явления внутри лифта будут происходить так, как если бы в нем действовало однородное гравитационное поле с напряженностью $g' = g - a$. В частности, когда лифт падает свободно, $g' = 0$, т. е. наступает «состояние невесомости». Допустим, что пассажир в лифте имеет возможность производить опыты только над телами внутри лифта и лишен возможности наблюдать внешний мир. Замечая, что все тела падают в лифте с одним и тем же ускорением, он не может на основании одного только этого факта решить, чем вызвано это ускорение: однородным гравитационным полем, ускоренным поступательным движением самого лифта, или, наконец, и тем и другим. Никакие опыты по свободному падению тел в лифте не могут отделить однородное гравитационное поле от однородного поля сил инерции. По предположению Эйнштейна это невозможно сделать и с помощью любых физических опытов. Это предположение Эйнштейн возвел в постулат и выдвинул принцип эквивалентности гравитационных сил и сил инерции.

Согласно этому принципу *все физические явления в гравитационном поле происходят совершенно так же, как и в соответствующем поле сил инерции, если напряженности обоих полей в соответствующих точках пространства совпадают, а начальные условия одинаковы для всех тел замкнутой системы.*

2. Принцип эквивалентности вовсе не утверждает, что всякое гравитационное поле может быть имитировано силами инерции, т. е. создано надлежащим ускоренным движением системы отсчета. Он не утверждает также, что любые силы инерции во всем пространстве можно заменить гравитационными. Оба эти утверждения верны, вообще говоря, только для однородных полей, т. е. таких полей, напряженность которых одна и та же во всех точках пространства. Для пояснения этого вернемся к прежнему примеру с лифтом. Пусть лифт неподвижно висит в поле тяжести Земли. Располагая точным гравитометром, пассажир в лифте заметит, что направления отвеса в различных точках кабины лифта не совсем параллельны, их продолжения пересекаются приблизительно в центре Земли. Далее, он найдет, что земное гравитационное поле возрастает в направлении к центру Земли. Короче, пассажир в неподвижном лифте может установить, что земное гравитационное поле *неоднородно*. Напротив, поле сил инерции, возникающее в лифте при его ускоренном поступательном движении, *однородно*. Оно не может во всех точках пространства внутри кабины лифта подменить неоднородное ньютоново поле земной тяжести. Можно создать внутри кабины лифта и неоднородное поле сил инерции, приведя лифт во вращение. Однако такое поле возросло бы при удалении от оси вращения,

т. е. вело бы себя совсем иначе, чем гравитационное поле Земли. Ньютоново гравитационное поле точечной массы убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от нее. Поле центробежных сил $\omega^2 r_{\perp}$, напротив, возрастает пропорционально расстоянию до оси вращения. Ясно, что ньютоново гравитационное поле точечной массы не может быть получено никаким вращением системы отсчета.

Однако в небольших объемах пространства, в которых гравитационное поле может считаться практически однородным, оно может быть приближенно имитировано ускоренным движением системы отсчета. Если хотят отметить это обстоятельство, то говорят, что принцип эквивалентности имеет локальный характер.

3. Кроме того, между ньютоновыми силами гравитационного притяжения и силами инерции имеется существенное различие, когда последние возникают во вращающихся системах отсчета. Ньютоновы гравитационные силы не зависят от скоростей тел, на которые они действуют. Тем же свойством обладают поступательные и центробежные силы инерции, а также вообще все переносные силы инерции. По своим физическим действиям переносные силы инерции совершенно эквивалентны ньютоновым гравитационным силам. Невозможно однозначно отделить ньютоново гравитационное поле от поля переносных сил инерции. Напротив, силы Кориолиса ведут себя существенно иначе, чем ньютоновы гравитационные силы. На покоящиеся (в рассматриваемой системе отсчета) тела они не действуют. Они возникают только при движении тела и пропорциональны его скорости. Тем не менее эквивалентность инертной и гравитационной масс делает целесообразным объединить гравитационное поле и поле всех сил инерции в единое поле. Это и делается в общей теории относительности. Для поля, получающегося в результате такого объединения, сохранено прежнее название — гравитационное поле. Сила инерции является частным случаем сил гравитационного поля, понимаемого в таком расширенном смысле. Общая теория относительности, или релятивистская теория гравитации, устанавливает уравнения гравитационного поля. Они называются уравнениями Эйнштейна. Закон всемирного тяготения Ньютона содержится в уравнениях Эйнштейна и верен только приближенно. Приближенный характер закона всемирного тяготения, впрочем, следует уже из того, что в основе этого закона лежит представление о мгновенном распространении взаимодействий. А такое представление имеет ограниченную область применимости.

4. В свете изложенного вернемся еще раз к вопросу об инерциальных системах отсчета. Пусть тело A настолько удалено от Солнечной системы, что ее гравитационным полем можно пренебречь. Тогда еще нельзя утверждать, что оно не подвержено действию никаких гравитационных полей. Мы не можем утверждать, что во Все-

ленной нет удаленных тел, создающих в месте нахождения тела A гравитационное поле \mathbf{g} конечной напряженности. Убывание гравитационного поля из-за расстояния до этих тел может быть компенсировано возрастанием их масс. Однако если изучаются явления в ограниченной области пространства S , то при не слишком больших размерах ее поле \mathbf{g} может считаться однородным. Тогда если тело A свободно падает в гравитационном поле \mathbf{g} , то это поле будет *полностью компенсировано поступательными силами инерции*. Если тело A и не вращается (относительно удаленных масс), то оно не будет подтверждено действием и остальных сил инерции. Система отсчета, связанная с таким невращающимся свободно падающим телом A , и будет инерциальной системой отсчета. Во всякой системе отсчета A' , вращающейся или движущейся ускоренно относительно системы A , появятся силы инерции. Но это движение не есть движение в «абсолютном пространстве», а *движение относительно удаленных тел Вселенной*. С этой точки зрения, принадлежащей Э. Маху (1838—1916), силы инерции возникают из-за вращений и ускоренных движений координатных систем относительно удаленных тел Вселенной. Это утверждение известно под названием *принципа Маха*. Точка зрения Маха очень привлекательна. Ее разделял в первоначальных работах Эйнштейн. Однако в дальнейшем он от нее отошел. В современных космологических теориях принцип Маха не используется. Здесь преждевременно обсуждать эти сложные и далеко еще не решенные вопросы.

§ 72. Гравитационное смещение спектральных линий

1. В качестве примера применения принципа эквивалентности гравитационных сил и сил инерции рассмотрим явление *гравитационного смещения спектральных линий*, теоретически предсказанное Эйнштейном. Будем исходить из представления, что свет есть волны, которые в вакууме распространяются со скоростью $c \approx 300\,000$ км/с. Свет определенной спектральной линии характеризуется определенной частотой или числом колебаний в секунду, которое мы будем обозначать ν . Такой свет называется *монохроматическим*, т. е. *одноцветным*. Пусть монохроматический свет приходит к нам от какого-либо удаленного источника, причем в пространстве, через которое он распространяется, гравитационного поля нет. Обозначим ν_0 частоту световой волны, которую воспринимает наблюдатель, покоящийся в какой-либо инерциальной системе отсчета. Если наблюдатель начнет двигаться навстречу световым лучам с постоянным ускорением a (рис. 196, а), то частота воспринимаемого света увеличится (эффект Доплера).

Простой расчет показывает, что с точностью до членов порядка $(v/c)^2$ относительное изменение воспринимаемой частоты определяется формулой

$$\frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} = \frac{v}{c},$$

где v — скорость наблюдателя. За положительные направления v и a мы принимаем направления против распространения света. Если наблюдатель