

друг другу с расхождениями около 10^{-3} . Поэтому при малой точности опыт типа Этвеша не мог бы решить вопрос. Однако точность опыта 10^{-12} приводит к категорическому выводу о том, что сила тяжести пропорциональна именно энергии тела, как и инертная масса. Такая точность означает прочность фундамента ОТО.

Эксперимент Этвеша показывает, что притяжение не определяется барионным зарядом тела и всемирное тяготение нельзя представлять себе наподобие электростатического притяжения разноименных электрических зарядов. Поэтому абсолютно ошибочны и антинаучны представления о том, что какие-то частицы, например, так называемая антиматерия (позитроны, антипротоны, антинейтроны), могут испытывать «антигравитацию». Из опытов на ускорителях хорошо известно, что для создания античастиц нужно затратить энергию; эта энергия является источником массы античастицы, античастица имеет весомую массу, в точности такую же, как и соответствующая частица. Косвенным доказательством этого являются и опыты Этвеша и Дикке.

Ли и Янг (1955) (см. также работу Дикке (1962)) ставили вопрос, нет ли *наряду* со всемирным тяготением еще аналога кулоновских сил, пропорциональных числу нуклонов; опыты Этвеша и Дикке показывают, что таких сил нет или, точнее, что если есть, то во всяком случае эти силы находятся за пределами точности опыта; для этого нужно, чтобы предполагаемые Янгом и Ли силы были в 10^7 раз слабее гравитационных и в 10^{43} раз слабее кулоновских (для двух протонов *).

Подчеркнем, что если бы силы, связанные с барионным зарядом, существовали, то ОТО тем не менее осталась бы в силе. Правда, в этом случае выявить из опыта фундаментальные факты, лежащие в основе ОТО, было бы гораздо сложнее.

§ 2. Основная идея ОТО

Ньютону представлялось очевидным, что физическое пространство — евклидово; существуют параллельные линии, сумма углов треугольника с прямыми сторонами равна π , длина окружности равна $2\pi r$ и т. д., а время течет всегда и везде одинаково.

Сама идея, что свойства пространства могут быть иными (например, сумма углов треугольника зависит от его площади), возникла гораздо позже. Математически такие пространства были открыты и исследованы Лобачевским.

*) Существование сил Ли и Янга невозможно в однородной изотропной космологической модели (см. об этом гл. 22 нашей книги «Релятивистская астрофизика»).

В СТО в инерциальной системе отчета квадрат четырехмерного расстояния (в пространстве и времени) между двумя бесконечно близкими событиями (интервал) записывается в виде

$$ds^2 = (cdt)^2 - (dx)^2 - (dy)^2 - (dz)^2, \quad (1.2.1)$$

где c — скорость света, t — время, x, y, z — декартовы координаты. Такая система координат носит название галилеевой.

Выражение (1.2.1) имеет вид, аналогичный выражению для квадрата расстояния в евклидовом трехмерном пространстве в декартовых координатах (с точностью до числа измерений и знаков перед квадратами дифференциалов в правой части). Такое пространство — время принято называть плоским евклидовым или, точнее, псевдоевклидовым, подчеркивая особый характер времени: в выражении (1.2.1) перед квадратом дифференциала времени стоит знак (+), в отличие от знаков перед пространственными координатами. Таким образом, СТО является теорией физических процессов в плоском пространстве — времени, носящем название пространства — времени Минковского.

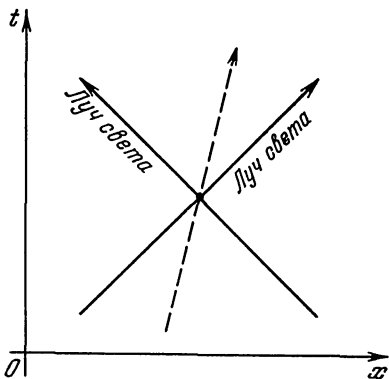


Рис. 1. Пространство — время Минковского. x — пространственная координата t — время. Пунктир — мировая линия пробной частицы, движущейся по инерции.

Движение свободной частицы по инерции в этом пространстве — времени изображается прямой линией (рис. 1). Эта линия носит название мировой линии свободной частицы. Мы не останавливаемся на упомянутых вопросах более подробно, предполагая, что читатель знаком с основами СТО.

Идея Эйнштейна, вдохновленная принципом эквивалентности и положенная в основу теории тяготения, заключается в том, что и в поле тяготения все тела движутся по экстремальным (геодезическим) линиям в пространстве — времени, которое, однако, уже не плоское, а искривленное.

Массы, создающие поле тяжести, искривляют пространство — время. Те тела, которые движутся в этом искривленном пространстве — времени, и в этом случае движутся по одним и тем же геодезическим линиям, независимо от массы или состава тела. Движение по геодезической в искривленном пространстве — времени воспринимается нами как движение по кривой с переменной скоростью. Но с самого начала в теории Эйнштейна заложено, что искривление траектории, закон изменения скорости — это

свойства пространства — времени, свойства геодезических в этом пространстве, а значит, ускорение любых разных тел должно быть одинаково, значит, отношение весомой массы к инертной (от которого зависит ускорение тела в данном поле тяжести) одинаково для всех тел. Таким образом, поле тяготения есть отклонение свойств реального пространства — времени от свойств плоского многообразия. Однако исторически Эйнштейн исходил из более наглядных представлений, из простой физической модели поля тяготения, обладающего свойством равенства ускорения всех тел.

Хорошо известна модель лифта: в отсутствие истинного поля тяготения в замкнутом, ускоренно движущемся объеме (в кабине лифта, к которой извне приложена сила) все явления протекают в точности так же, как в поле тяготения в таком же объеме, покоящемся или движущемся равномерно *). Относительно кабины тела движутся ускоренно и это ускорение одинаково для всех тел. В ускоренно движущейся кабине (без истинного тяготения) можно наблюдать и другие проявления тяготения, например, изменение частоты распространяющегося света. В самом деле, будем сравнивать частоту испущенного света с частотой света, принятого через время Δt после испускания. За это время скорости кабины и всехпредметов изменятся вследствие ускорения. Значит, скорость приемника света в момент приема будет отличаться от скорости источника. За счет доплер-эффекта возникает разность частот испущенного и принятого света, зависящая от направления луча света и направления ускорения. Такова трактовка внешнего наблюдателя, знающего, что кабина движется ускоренно.

Внутренний наблюдатель в лифте приписывает изменения частоты действию на свет того же «гравитационного» поля, которое вызывает ускоренное движение (относительно кабины) свободных тел внутри кабины.

Если это ускорение направлено от излучателя к приемнику, то свет испытывает «синее» смещение, в противоположном случае — «красное».

Точно так же легко убедиться, что в кабине будет наблюдаться искривление траектории светового луча относительно трехмерной системы координат, скрепленной с кабиной. Таким образом, явления в ускоренно движущейся системе отсчета и в поле тяготения в точности одинаковы.

Однако этот прием описывает только однородное гравитационное поле, одинаковое по величине и направлению во всем пространстве. Поля тяготения, создаваемые отдельными телами, не таковы.

*) В поле тяготения для того, чтобы кабина покоилась, к ней также должна быть приложена внешняя сила, уравновешивающая силу тяготения.

Для того чтобы имитировать поле тяготения Земли, например, нужны лифты с различным направлением ускорения в различных точках. Установив между собой связь, наблюдатели в различных лифтах обнаружат, что они движутся друг относительно друга и! тем самым установят наличие истинного поля тяготения, которое нельзя свести к одной ускоренно движущейся системе координат. Истинное гравитационное поле нельзя устранить преобразованием координат; это особенно подчеркивает в своей известной монографии Фок (1964). Однако модель лифта настолько естественно описывает важнейшие свойства тяготения (равенство ускорений всех тел, влияние на свет), что от нее неразумно отказываться. Для того чтобы сохранить применимость этой модели локально (в каждой точке пространства — времени), вводят соответствующее преобразование системы отсчета в каждой области. При этом, однако, оказывается, что в целом глобально преобразование уже не сводится просто к иному движению в плоском пространстве — времени, а означает переход к искривленному пространству — времени.

В следующих параграфах будут кратко изложены математические методы описания кривизны пространства — времени, необходимые для дальнейшего. Читателей, интересующихся подробным изложением вопроса, мы отсылаем к книгам Рашевского (1964), Ландау и Лифшица (1967) и работе Зельманова (1959а).

§ 3. Неинерциальные и нестатические системы в пространстве — времени Минковского

Для того чтобы лучше уяснить смысл кривизны пространства — времени, напомним сначала особенности геометрии пространства и течения времени в неинерциальных и нестатических системах отсчета, движущихся с ускорением в плоском пространстве — времени Минковского. Это позволит нам ввести понятия, необходимые для вычислений в искривленном пространстве — времени *).

В мире Минковского (т. е. вдали от тяготеющих масс) геометрия в инерциальной системе отсчета евклидова и время течет везде одинаково.

Рассмотрим теперь, следуя Эйнштейну (1965 **) (см. также Ландау и Лифшиц (1967)), равномерно вращающийся диск. Наблюдатель А, не участвующий во вращении, может измерить длину

*) С математической точки зрения это соответствует введению криволинейных координат на плоскости. полученный аппарат затем используется для вычислений на кривой поверхности, где пользоваться криволинейными координатами просто необходимо.

**) Мы ссылаемся на собрание трудов Эйнштейна, первый том которых вышел в 1965 г.