**Общая теория относительности**

Марио Льоцци: ТЯЖЕЛАЯ МАССА И ИНЕРТНАЯ МАССА

Подобно классической механике, специальная теория относительности также приписывала привилегированное положение «галилеевым» наблюдателям, т. е. наблюдателям, находящимся в системах, движущихся равномерно и прямолинейно. Но что является основанием этого преимущества галилеевых систем отсчета? Ответить на такой вопрос было очень нелегко.

В 1907 г. Эйнштейн приступил к исследованию этого вопроса, начав с критического пересмотра одного факта, хорошо известного классической физике. В классической физике инертная масса тела определяется как постоянное отношение приложенной к ней силы к приобретаемому ускорению, а тяжелая масса определяется как отношение веса тела к ускорению cилы тяжести. Очевидно, нет никаких оснований априори считать, что обе определенные так массы равны между собой, поскольку тяготение не имеет никакого отношения к определению инертной массы. Равенство обеих масс (при надлежащем выборе единиц) является опытным фактом, который был установлен Ньютоном в опытах с маятниками, а еще раньше Галилеем в опытах с падающими телами. При падении тел ускорение пропорционально тяжелой массе и обратно пропорционально инертной массе, и поскольку все тела падают с одинаковым ускорением, то обе массы равны. Подобное рассуждение имеется еще у Бальяни, который, отождествляя тяжелую и инертную массы, приходил к выводу о постоянстве ускорения силы тяжести.

В более позднее время Р. Этвеш в серии весьма точных опытов, проведенных с 1890 по 1910 г. и продолженных в 1922 г., показал, что эта эквивалентность тяжелой и инертной масс соблюдается с точностью выше одной двадцатимиллионной. Опыты Этвеша основаны на том, что равновесие отвеса определяется притяжением Земли, зависящим от тяжелой массы, и центробежной силой, вызванной вращением Земли и зависящей от инертной массы. Если бы эти массы не были одинаковы, то направление отвеса зависело бы от материала (свинец, железо, стекло и т. д.), из которого сделан шар отвеса. Однако Этвеш с помощью чувствительнейших крутильных весов установил, что отвес не меняет своего направления независимо от материала, из которого он изготовлен. Таким образом, в равенстве тяжелой и инертной масс сомневаться невозможно. Классическая механика в этом и не сомневалась, но она принимала этот факт как случайный, даже не пытаясь как-нибудь его объяснить.

В упомянутой работе 1907 г. Эйнштейн показал с помощью наглядных соображений, что равенство тяжелой и инертной масс совсем не случайный факт, что оно носит особый характер, проявляясь как внутреннее свойство гравитационного поля. Эйнштейн пришел к этому выводу с помощью мысленного опыта, ставшего теперь классическим, опыта со свободно падающим лифтом. Представим себе гигантский небоскреб высотой 1000 км и физика, находящегося внутри свободно падающего лифта в этом небоскребе. Физик выпускает из рук платок или часы и убеждается, что они не падают на пол лифта. Если он сообщает этим вещам толчок, то они движутся равномерно и прямолинейно, пока не столкнутся со стенками лифта. Физик приходит к выводу: я нахожусь в ограниченной галилеевой системе. Условие ограниченности необходимо для того, чтобы можно было считать, что все тела испытывают одинаковое ускорение. Но физик, наблюдающий извне за падением лифта, будет судить о вещах совершенно иначе. Он видит, что лифт и все находящиеся в нем тела движутся ускоренно в соответствии с законом тяготения Ньютона.

Этот пример показывает, что можно перейти от галилеевой системы к ускоренной, если учесть гравитационное поле. Иными словами, гравитационное поле (в котором проявляется тяжелая масса) эквивалентно ускоренному движению (в котором проявляется инертная масса). Тяжелая масса и инертная масса характеризуют одно и то же свойство материи, рассматриваемое по-разному. Таким образом, Эйнштейн пришел к принципу эквивалентности, который он так сформулировал в своей автобиографии: «В поле тяготения (малой пространственной протяженности) все происходит так, как в пространстве без тяготения, если в нем вместо „инерциальной" системы отсчета ввести систему, ускоренную относительно нее».

Принцип эквивалентности можно сформулировать и иначе: наблюдатель никакими опытами в своей системе отсчета не может различить, находится ли он в гравитационном поле или же ускоренно движется. Для случая мысленного эксперимента со свободно падающим лифтом принцип эквивалентности справедлив в небольшой части пространства, т. е. имеет локальный характер.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Принцип эквивалентности послужил отправной точкой для переработки теории относительности в новую теорию, которую Эйнштейн назвал общей теорией относительности (в отличие от нее прежняя теория была названа специальной). Новая теория была изложена Эйнштейном после подготовительных работ 1914—1915 гг. в фундаментальном труде «Die Grundlage der allgemeinen Relativitatstheorie» («Основы общей теории относительности»). Вторая часть этой работы посвящена описанию математического аппарата, необходимого для развития этой теории. К счастью, такой аппарат уже существовал — это было так называемое «абсолютное дифференциальное исчисление», приведенное в систему еще в 1899 г. Грегорио Риччи-Курбастро (1853—1925) и Туллио Леви-Чивита (1873-1941).

Основной постулат общей теории относительности заключается в том, что не существует привилегированных систем координат. «Законы физики, — говорит Эйнштейн, — должны быть таковы по природе, что они должны быть применимы к произвольно движущимся системам отсчета».

Законы физических явлений сохраняют свою форму для произвольного наблюдателя, так что уравнения физики должны оставаться инвариантными не только при лоренцевых, но и при произвольных преобразованиях.

Выведенные отсюда Эйнштейном математические следствия не менее важны, чем следствия из специальной теории относительности. Они ведут к дальнейшему обобщению понятий пространства и времени. Если кинематическое изменение видоизменяет или уничтожает гравитацию в какой-либо системе отсчета, то ясно, что между гравитацией и кинематикой существует тесная связь. А поскольку кинематика — это геометрия, к которой добавлена еще одна, четвертая переменная — время, то Эйнштейн интерпретирует явления гравитации как геометрию пространства-времени. Отсюда вытекает что, согласно общей теории относительности, наш мир не является евклидовым; его геометрические свойства определяются распределением масс и их скоростями.

С помощью знаменитого мысленного эксперимента, о котором было много споров, Эйнштейн со всей очевидностью показал тесную связь между кинематикой и геометрией. Предположим, что наблюдатель находится на круглой платформе, быстро вращающейся по отношению к внешнему наблюдателю. Внешний наблюдатель вычерчивает в своей, галилеевой системе отсчета окружность, равную внешней окружности платформы, измеряет ее длину и ее диаметр, составляет их отношение и находит число π евклидовой геометрии. Наблюдатель, находящийся на платформе, выполняет те же измерения с помощью той же линейки, которой пользовался внешний наблюдатель. Линейка, помещенная вдоль радиуса платформы, хотя и находится в движении относительно внешнего наблюдателя, не претерпевает изменения длины, потому что платформа движется перпендикулярно радиусу. Но когда наблюдатель начинает измерять периметр платформы, то линейка по отношению к внешнему наблюдателю представляется укороченной, потому что в этом положении она движется в направлении своей длины (лоренцево сокращение), платформа кажется более длинной и для числа π получается значение, большее, чем в предыдущем случае.

Аналогичное явление имеет место и со временем. Если взять двое идентичных часов и одни поместить в центре платформы, а другие — на периферии, то внешний наблюдатель увидит, что часы, находящиеся на периферии и движущиеся по отношению к другим часам, идут медленнее, чем часы, находящиеся в центре, и придет к заключению, что часы на периферии действительно отстают.

Но, согласно принципу эквивалентности, явления движения аналогичны явлениям гравитации. Следовательно, в гравитационном поле евклидова геометрия уже не справедлива, а часы отстают. Пример с платформой имеет прежде всего дидактическое значение; математически гравитационное поле отличается от центробежного поля вращающейся платформы. В гравитационном поле, создаваемом центральной массой, сокращаются радиальные размеры и остаются неизменными поперечные. Поэтому отношение окружности к диаметру становится меньше π. Эддингтон рассчитал порядок величины этого изменения числа∏: если массу в одну тонну поместить в центре окружности радиусом пять метров, то число ∏ изменится в 24-м знаке.

В общей теории относительности уравнения гравитации имеют тот же вид, что и уравнения Максвелла (в том смысле, что они описывают изменения гравитационного поля); из них вытекают геометрические свойства нашего неевклидова мира.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ

Новые законы тяготения приводят к некоторым следствиям, поддающимся экспериментальной проверке. Поскольку энергия обладает массой, а инертная масса является также и тяжелой массой, то отсюда следует, что тяготение действует и на энергию. Поэтому луч света, проходящий в гравитационном поле, должен отклоняться. Фактически такое отклонение вытекает также из ньютоновской корпускулярной теории света; расчет отклонения луча света звезды, проходящего близ Солнца, был проведен еще в 1804 г. Зольднером, который получил значение вдвое меньше рассчитанного по теории относительности. Опыты, проведенные во время полных солнечных затмений 29 мая 1919 г. и 21 сентября 1922 г., подтвердили выводы общей теории относительности и в количественном отношении (хотя среди астрономов полного согласия не было). Подтверждение не предсказываемого специальной теорией относительности влияния тяготения на прохождение луча показывает, что теория справедлива лишь в отсутствие гравитационных полей. По отношению к общей теории относительности она оказывается лишь приближенной теорией, точно так же как классическая механика является приближенной теорией по отношению к специальной теории относительности.

Второе подтверждение общей теории относительности было получено при исследовании движения планет. Одним из следствий общей теории относительности является то, что эллиптическая траектория движения планеты должна медленно поворачиваться вокруг Солнца. Этот эффект, не предсказываемый ньютоновской теорией, должен быть наибольшим для ближайших к Солнцу планет, для которых сила тяготения максимальна. Ближайшей к Солнцу планетой является Меркурий, поэтому именно на движении этой планеты можно наблюдать указанный эффект, который столь слаб, что, согласно расчетам, потребовалось бы три миллиона лет, чтобы орбита Меркурия совершила полный оборот.

Медленное вращение орбиты Меркурия, или, точнее, смещение его перигелия, было замечено астрономами, которые пытались объяснить это возмущениями движения Меркурия, вызываемыми другими планетами. Но расчеты, проведенные исходя из этого предположения, приводят к значению смещения меньше наблюдаемого. Расхождение между расчетным и наблюдаемым значениями никак не удавалось объяснить в рамках ньютоновской механики. С точки зрения общей теории относительности вопрос был рассмотрен впервые в 1915 г. Эйнштейном и окончательно решен в 1916 г. Шварцшильдом. Совпадение результатов расчета по общей теории относительности с данными астрономических наблюдений производило особое впечатление потому, что оно было достигнуто без всяких дополнительных гипотез, как прямое следствие общей теории относительности.

Третьим подтверждением общей теории относительности, которое после периода взаимно противоречащих результатов теперь представляется надежным, является так называемый «эффект Эйнштейна», т. е. смещение спектральных линий излучения звезд в сторону красного цвета. Как мы уже упоминали, часы, расположенные в поле тяготения, идут медленнее, а поскольку колебательное движение можно уподобить часам, то теория предсказывает уменьшение частоты светового излучения в присутствии поля силы тяжести. Отсюда следует, что спектральные линии света, излученного звездой, должны быть смещены в красную сторону по сравнению с соответствующими линиями, в спектрах земных источников. Этот факт, по-видимому, подтверждается исследованием спектра света от звезд-карликов, средняя плотность которых в десятки тысяч раз больше плотности воды. В 1925 г. Адаме, фотографируя спектры Сириуса и его спутника Сириуса В, наблюдал красное смещение. В количественном отношении это явление тоже как будто хорошо согласуется с предсказаниями теории.

О СУДЬБЕ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Число исследований по вопросам теории относительности, проведенных математиками, физиками и философами, неизмеримо велико; едва ли можно указать в истории физики другой аналогичный пример бурного расцвета теории. Собранная Лека в 1924 г. библиография насчитывала уже около 4000 наименований книг, брошюр и статей. Естественно, что столь оригинальные идеи не могли войти в науку, не натолкнувшись на сильнейшее противодействие, а когда в первые годы после мировой войны элементы теории относительности распространились среди широкой публики, то к научной критике специалистов присоединилась горячая реакция различных по характеру людей, недостаточно компетентных, чтобы судить о теории по существу. Противники теории, как компетентные, так и некомпетентные, отрицая теорию относительности, в конечном счете апеллировали к «здравому смыслу». Во времена Галилея «здравый смысл» также призывался в качестве высшего судьи в споре между птолемеевой и коперниковой системами. Но в обоих случаях здравый смысл, который сам изменяется вместе со временем, в конце концов становился на сторону нового.

Сейчас все эти горячие дискуссии затихли. Теория относительности уже не вызывает возражений со стороны ученых. Наоборот, как метко заметили Макс Планк и Луи де Бройль, теперь уже ее следует рассматривать как составную часть классической физики, основным законам которой она не противоречит, затрагивая лишь некоторые обыденные представления, как, например, представление об абсолютном пространстве и времени. Сплотив воедино понятия пространства и времени, массы и энергии, тяготения и инерции, эта теория наравне с другими теориями классической физики подчинилась той унифицирующей тенденции, которая, как мы отмечали ранее, воодушевляла физику XIX века.

Составитель Савельева Ф.Н.