

# Совершенство теории гравитации Эйнштейна \*)

Эйнштейн открыл для нас теорию гравитации, связанную с кривизной пространства. Этим он положил начало новому направлению, побудив физиков использовать неевклидово пространство. Частным случаем пространства, введенного Эйнштейном, является пространство Римана — пространство, которое может быть вложено в плоское пространство с большим числом измерений. Под влиянием Эйнштейна многие пытались ввести в физику разные типы пространств, но реального успеха пока никто не добился. Во всяком случае, насколько можно сейчас судить, введенное Эйнштейном пространство — это то, которое используется Природой.

Никто, кроме нескольких специалистов, ничего не знал о теории относительности до последних месяцев 1918 года, когда кончилась первая мировая война. Появление теории относительности сопровождалось тогда большим шумом. Она продемонстрировала миру новый стиль мышления, новую философию.

Это было время, когда все устали от войны — как победители, так и побежденные. Людям хотелось чего-нибудь нового, и теория относительности дала как раз то, чего им не хватало. Она захватила широкие слои публики и стала главной темой всех разговоров. Теория позволяла хотя бы на время забыть ужасы войны, через которые всем пришлось пройти.

В газетах, журналах и везде, где только можно, публиковались бесчисленные статьи об относительности. Ни до, ни после теории Эйнштейна ни одна научная идея не вызвала столь широкого интереса. То, о чем говорили и писали, большей частью относилось к общефилософским идеям, не обладавшим точностью, необходимой для серьезного научного обсуждения. Существовало слишком мало точных данных, и тем не менее все были рады просто высказать свою точку зрения.

В то время я учился на инженерном факультете Бристольского университета. Конечно же, студенты ухватились за эту тему и широко обсуждали ее. Но ни студенты, ни профессора не обладали точной информацией и ничего не знали о той математике, которая лежит в основе теории относительности. Мы могли лишь рассуждать о ее философском смысле и присоединиться к общему мнению, что новая теория хороша.

\*) The Excellence of Einstein's Theory of Gravitation // Impact of Science in Society.— 1979.— Vol. 29.— P. 11—14; см. также: Commemoration of Einstein.— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1981.— P. 39—48.

В Англии один человек, А. С. Эддингтон, действительно понимал теорию относительности и стал в ней лидером и авторитетом. Эддингтон интересовался астрономическими следствиями теории и думал о возможности ее экспериментальной проверки. Существовало три возможности проверки теории, и вскоре благодаря Эддингтону о них услышал каждый.

Первый тест связан с планетой Меркурий. Давно было известно, что движение Меркурия не согласуется с теорией Ньютона. Наблюдения показывали, что смещение перигелия орбиты Меркурия на 42 угловые секунды (42") в столетие нельзя было объяснить с помощью теории Ньютона. А теория Эйнштейна требовала такого смещения и давала для него значение 42" в столетие. Обнаруженное совпадение знаменовало собой замечательный успех теории. Говорят, правда, что сам Эйнштейн, услышав об этом, вовсе не пришел в неопиcуемый восторг. Он и так не сомневался в правильности своей теории!

По эйнштейновской теории тяготения свет, проходя вблизи Солнца, должен претерпевать отклонение. Теория Ньютона тоже требует отклонения, но в два раза меньшего. Следовательно, можно проверить теорию Эйнштейна, наблюдая находящиеся «позади Солнца» звезды, свет от которых попадает на Землю, проходя вблизи Солнца. Это и будет второй тест.

Такие наблюдения можно производить только в момент полного солнечного затмения, потому что при свете Солнца звезды не видны. Подходящее солнечное затмение произошло в 1919 году. Для его наблюдения Эддингтон организовал две экспедиции, одну из которых возглавил он сам. Результаты, полученные обеими экспедициями, согласовывались с теорией Эйнштейна и противоречили теории Ньютона. Однако из-за сложности наблюдений точность, с которой подтверждалась теория Эйнштейна, оказалась невелика. С тех пор подобные наблюдения не раз проводились при полных солнечных затмениях. Теория Эйнштейна всегда подтверждалась, но точность опытов была ниже, чем этого хотелось бы.

Открытие звезд, излучающих радиосигналы, дало еще один способ проверки: во втором тесте вместо световых волн стало возможным использовать радиоволны. Для этого радиисточник должен располагаться за Солнцем. Тогда надо лишь дождаться того, чтобы Солнце прошло перед звездой, и проверить, отклонится ли звезда от своего видимого положения. Для таких наблюдений не нужно ждать полного солнечного затмения, потому что Солнце не является мощным источником радиоволн. Использование вместо света радиоволн несколько усложняет эксперимент, потому что радиоволны отклоняются солнечной короной. Можно, однако, работать с двумя разными длинами волн, которые будут по-разному отклоняться короной, и тем самым выделить эффект Эйнштейна. В результате теория Эйнштейна подтверждается со значительно лучшей точностью, чем в эксперименте со светом.

Третий эффект, который может быть использован для проверки теории Эйнштейна,— это красное смещение спектральных линий,

вызванное гравитационным потенциалом их источника. Этот эффект, естественно, следует искать, наблюдая свет, испускаемый поверхностью Солнца. Однако интересующий нас эффект будет искажен эффектом Доплера, связанным с движением источника излучения. Оценив эффект Доплера, мы получим довольно грубое подтверждение теории Эйнштейна, настолько грубое, что такой эксперимент нельзя считать достаточно эффективным тестом.

Открытие белых карликов дает лучший способ проверки теории Эйнштейна с помощью эффекта красного смещения. Белый карлик состоит из такого плотного вещества, что гравитационный потенциал на его поверхности очень велик, а потому велико и предсказанное Эйнштейном красное смещение. Если наши знания о белом карлике достаточны, чтобы определить его массу и радиус, то получится хороший тест теории Эйнштейна. Оказалось, что теория хорошо подтверждается.

Как показал Р. Л. Мёсбауэр, этот эффект можно проверить и в наземных экспериментах. Источник электромагнитных волн размещается в лаборатории, а наблюдатель располагается где-нибудь ниже, чтобы гравитационный потенциал в точке наблюдения был меньше, чем около излучателя. Для этого опыта лучше всего использовать  $\gamma$ -излучение определенной частоты. Было показано, что при изменении гравитационного потенциала частота излучения возрастает. Значение изменения частоты подтверждает теорию Эйнштейна, причем со значительно лучшей точностью, чем в любом астрономическом эксперименте.

Недавно к трем классическим тестам добавился еще один, четвертый. Его идея связана со временем прохождения света вблизи Солнца. По теории Эйнштейна это время увеличивается. Для наблюдения эффекта надо направить излученные радаром волны на планету, находящуюся за Солнцем, и измерить время, в течение которого отраженные волны вернутся на Землю. На замедление радиоволн влияет солнечная корона, и для того чтобы отделить это влияние от эффекта Эйнштейна, нужно опять воспользоваться двумя разными длинами волн. И. И. Шапиро поставил описанный эксперимент и получил хорошее подтверждение теории Эйнштейна.

Результаты наблюдения двойных пульсаров тоже могут дать некоторые сведения о теории Эйнштейна. Пульсар обычно излучает радиоволны с очень высокой периодичностью. Но раз пульсар составляет часть двойной системы, то в результате его вращения вокруг второй звезды должны возникать нерегулярности, связанные с эффектом Доплера и с эйнштейновской прецессией орбиты пульсара. Последний эффект аналогичен смещению перигелия Меркурия в первом тесте, но значительно больше по величине.

Результаты наблюдений качественно подтверждают теорию Эйнштейна, но произвести количественную проверку невозможно из-за недостатка информации о параметрах двойной системы.

Я перечислил успехи эйнштейновской теории гравитации. Это длинный и довольно впечатляющий список. Теория Эйнштейна каждый раз подтверждается с большей или меньшей степенью точ-

ности, зависящей от точности наблюдений и от того, с какими неопределенностями был связан эксперимент.

Теперь посмотрим, что будет, если возникнет достоверно подтвержденное расхождение между теорией и экспериментом. Как реагировать на такое расхождение? Как бы на него реагировал сам Эйнштейн? Следует ли тогда считать, что теория неверна в своей основе?

На последний вопрос я бы ответил решительно «нет». Теории гравитации Эйнштейна присуще совершенство особого рода. Тот, кто сумеет оценить фундаментальную гармонию между путями развития Природы и общими математическими принципами, наверняка поймет, что теория, обладающая красотой и элегантностью теории Эйнштейна, просто *обязана* быть правильной. И если в каком-нибудь из приложений теории возникнет расхождение, то причину его следует искать не в крахе общих принципов теории, а в каком-то связанном с этим приложением побочном явлении, которое не было соответствующим образом учтено. Такая уверенность в теории Эйнштейна объясняется ее необыкновенной красотой, которая совершенно не зависит от отдельных удач или неудач. Наверное, именно уверенность в необыкновенной красоте математического описания Природы и вдохновила Эйнштейна на его поиски теории тяготения.

Работая над теорией тяготения, Эйнштейн не пытался объяснять какие-то результаты наблюдений. Он был от них далек. Главной его целью был поиск красивой теории, такой, которую должна была выбрать Природа. Нужно обладать подлинным духом гения, чтобы из одних лишь абстрактных размышлений составить представление о том, какой должна быть Природа. Эйнштейн сумел это сделать.

У него почему-то возникла идея связать тяготение с кривизной пространства, и он сумел облечь эту идею в математическую схему, руководствуясь лишь соображениями красоты уравнений. Конечно, всякий свободен в выборе уравнений по своему вкусу, заботясь лишь о математической строгости, но это уже сильно ограничивает свободу выбора.

Результатом такого подхода стала теория, в основе которой лежали чрезвычайно простые и красивые идеи. Появляется нерушимая вера в то, что теория верна, совершенно независимо от ее согласия с наблюдениями. Если возникнут какие-то расхождения, то нельзя допускать, чтобы из-за них поколебалась вера в правильность общей схемы; их надо объяснить какими-то тонкостями, из-за которых теория оказывается неполной, а вовсе не абсолютной неудачей теории.

Любая построенная нами теория, возможно, неполна. Существует еще очень много неизвестного, и не стоит так уж расстраиваться из-за обнаруженного расхождения. Оно несколько не умаляет совершенства теории, выдвинутой на основании интуитивного представления о том, как устроена Природа.

Эти замечания я могу проиллюстрировать рассказом о другом важном физическом открытии, сделанном в наши дни. Я имею в виду

волновое уравнение квантовой механики, открытое Шрёдингером. Он занимался волнами де Бройля. Руководствуясь лишь соображениями математической красоты, де Бройль постулировал, что движение любой материальной частицы связано с волнами. Шрёдингер обобщил эту мысль, получив элегантное уравнение, которое описывало волны, связанные с электроном, движущимся в электромагнитном поле. Затем Шрёдингер записал свое уравнение для электрона в атоме водорода и вычислил спектр атома водорода. Полученный результат не согласовывался с опытом.

Шрёдингер был очень подавлен. Он потерял веру в правильность своих основных представлений и решил, что ошибочен сам подход. И тогда он его отбросил. Лишь через несколько месяцев Шрёдингеру удалось оправиться от потрясения и вновь приступить к работе. Вскоре он обнаружил, что теория согласуется с экспериментом, если воспользоваться приближением, в котором отбрасываются эффекты, связанные со специальной теорией относительности. Тогда Шрёдингер опубликовал свое уравнение в качестве уравнения нерелятивистской теории атома водорода.

Впоследствии выяснилось, что расхождение возникло из-за спина электрона, который не был известен, когда Шрёдингер сделал свою пионерскую работу. Из этой истории следует, что нужно в первую очередь руководствоваться соображениями математической красоты, не придавая особого значения расхождениям с опытом. Расхождения вполне могут быть вызваны какими-то вторичными эффектами, которые прояснятся позже. Хотя пока еще никаких расхождений с теорией гравитации Эйнштейна не обнаружилось, в будущем такое расхождение может появиться. Тогда его надо будет объяснять не ложностью исходных посылок, а необходимостью дальнейших исследований и усовершенствований теории.

Исследования могут идти в двух очевидных направлениях:

- а) разработка метода введения в теорию электромагнитных полей;
- б) исследование требований космологии, изменяющих условия на больших расстояниях в любых приложениях уравнений теории гравитации. Эйнштейн прекрасно осознавал существование этих задач.

Есть почти очевидный способ такого использования стандартных уравнений электромагнитной теории в римановом пространстве, чтобы они не вступали в противоречие с теорией гравитации Эйнштейна. Но возникает вопрос: будет ли получившаяся теория применима к Природе? Тут есть сомнения, потому что в новой теории электромагнитное поле все время остается в стороне и вводится лишь в самом конце. Только гравитационное и электромагнитное поля являются дальнедействующими, и поэтому мы приходим к выводу о том, что они должны быть очень тесно связаны друг с другом. Возможно, их нельзя понять поодиночке, и требуется какая-то более общая геометрия, которая связывает эти поля друг с другом. Подобные идеи приходили в голову и Эйнштейну. Он потратил десятилетия на поиски улучшенной теории поля, которая объединила бы гравитацию и электромагнетизм, но так и не пришел ни к ка-

кому результату, и, таким образом, задача (а) должна пока считаться нерешенной.

Что касается (б), то здесь возможен некоторый прогресс. Нужна такая космологическая модель Вселенной, которая была бы применима в случае, когда все локальные неоднородности, связанные с существованием звезд и галактик, считаются сглаженными.

Вскоре Эйнштейн придумал свою модель, которую мы назовем моделью 1. Эта модель описывает статическую Вселенную равномерной плотности, замкнутую по пространственным направлениям. Уравнения поля должны включать в себя некоторую космологическую постоянную. Эта модель не годилась из-за своей статичности, так как она противоречила наблюдениям, из которых следовало, что галактики разбегаются от нас со скоростями, растущими по мере удаления галактик от Земли.

Вторую модель (модель 2) предложил де Ситтер. Модель де Ситтера приводит к разбеганию удаленной материи в полном согласии с экспериментом. Уравнения поля в этой модели тоже содержат космологическую постоянную. Но и эта модель не годится, потому что из нее следует, что во Вселенной со сглаженными неоднородностями плотность вещества равна нулю.

В 1932 году Эйнштейн и де Ситтер вместе предложили третью модель (модель 3), элемент длины в которой имеет вид

$$ds^2 = dt^2 - t^{4/3} (dx^2 + dy^2 + dz^2). \quad (1)$$

В модели 3 не нужна космологическая постоянная, правильно описывается разбегание удаленной материи и получается правильная по порядку величины плотность вещества. Кроме того, модель Эйнштейна и де Ситтера приводит к давлению, равному нулю, как это и должно быть в тех приближениях, которые в ней используются. Таким образом, модель 3 вполне допустима.

Фридман, Леметр и другие разработали немало моделей, согласующихся с эйнштейновскими уравнениями поля как с космологической постоянной, так и без нее. Любую из этих моделей можно использовать в качестве дополнения к уравнениям поля Эйнштейна для наложения условий при  $r = \infty$ . Изменения, которые могли бы в результате возникнуть при использовании уравнений Эйнштейна для описания Солнечной системы, столь незначительны, что не могут повлиять на достигнутые успехи, о которых уже шла речь.

Существует еще одна идея, и мне бы хотелось вам ее представить как дополнение к теории Эйнштейна. Речь идет о гипотезе больших чисел, согласно которой все очень большие числа, составленные из разнообразных физических и астрономических «констант», на самом деле не являются постоянными, а с помощью простых уравнений с близкими к единице коэффициентами связаны с эпохой — временем, прошедшим с момента возникновения Вселенной. Таким образом, все большие числа изменяются с изменением эпохи по закону, который определяется их значением.

Приняв гипотезу больших чисел, мы обнаружим, что из всех перечисленных моделей разрешена лишь модель 3, и нас, таким

образом, больше не должно мучить существование нескольких возможностей.

Микроволновое излучение, приходящее из космоса, распространяется одинаково во всех направлениях и интерпретируется как остатки первоначального взрыва. Результаты наблюдений согласуются с гипотезой больших чисел, если ее дополнить моделью 3. Такое согласие надо считать сильным аргументом в пользу как гипотезы больших чисел, так и модели 3.

Гипотеза больших чисел приводит к требованию, чтобы интервал  $ds$  в теории Эйнштейна (назовем его  $ds_E$ ) не был равен интервалу  $ds$ , измеренному с помощью атомных часов (назовем его  $ds_A$ ). Эти интервалы связаны соотношением

$$ds_E = t_A ds_A, \quad (2)$$

где  $t_A$  — значение эпохи, измеренное атомными часами. Этот эффект можно проверить на опыте, и поисками его в течение нескольких лет занимается Ван Фландерн. Он сравнивает результаты наблюдений лунных колебаний в эфемеридном и атомном временах, но пока ему не удалось достичь удовлетворительных результатов.

Кое-какие указания недавно были получены Уильямсом, Синклером и Йодером в экспериментах по лазерной локации Луны. Эти работы в какой-то степени подтверждают соотношение (2), но из-за очень больших погрешностей никакого определенного вывода сделать нельзя.

Соотношение (2) можно проверить с помощью радиолокационных исследований движения планет. Излученные радаром волны посылаются на одну из ближайших планет, и исследуется излучение, возвратившееся на Землю. Время, затраченное волнами на путь туда и обратно, измеряется с помощью атомных часов. Этот метод был разработан Шапиро и Ризенбергом. Их результаты согласуются с соотношением (2), но это подтверждение ненадежно, потому что погрешности эксперимента сравнимы с величиной искомого эффекта.

Во время полета «Викинга» на Марс в 1976 году на поверхность Марса был спущен аппарат, с помощью которого можно очень точно измерить расстояние от Марса до Земли, в результате чего проверка соотношения (2) должна стать гораздо более надежной. Результатов пока нет, но вскоре они, может быть, появятся.

Итак, мы обсудили одну из возможностей дополнить теорию Эйнштейна, добавив к ней гипотезу больших чисел. До сих пор не существует прямых экспериментальных подтверждений гипотезы больших чисел. Однако я уверен в том, что эта идея верна в своей основе, благодаря простоте и той естественности, с которой она позволяет закрыть существующий пробел и дать однозначную космологическую модель.