

ГЛАВА 6

МНИМОЕ ВРЕМЯ

Пространство и время едины...

Кроме известных человеку,
есть еще пятое измерение.

*Род Серлинг,
«Сумеречная зона»¹*

После того как Эйнштейн опубликовал свои первые статьи по теории относительности, его бывший учитель математики Герман Минковский² был весьма удивлен. Он не запомнил Эйнштейна как особо выдающегося студента. (Неправильно говорить, что юный Альберт оказался слаб в математике: просто курс Минковского был действительно очень

¹ «Сумеречная зона» (The Twilight Zone) — американский телесериал, созданный Р. Серлингом. Каждый эпизод сочетает фэнтези, научную фантастику, драму или ужас, часто заканчивающийся жуткой или неожиданной развязкой. Популярный как у зрителей, так и среди критиков, сериал многим открыл серьезную научную фантастику и абстрактные идеи. В России стал известен после показа в 1985–1989 гг. телевизионной версии. *Прим. перев.*

² Герман Минковский (1864–1909) — немецкий математик российского происхождения, разработавший геометрическую теорию чисел и геометрическую четырехмерную модель теории относительности. Его первые результаты касались теории квадратичных форм. В 1896 г. опубликовал результат, ныне известный как теорема Минковского о выпуклом теле. В 1907 г. предложил геометрическое представление кинематики теории относительности, введя четырехмерное псевдоевклидово пространство (пространство Минковского). Серьезный вклад внес также в гидродинамику и теорию капиллярности. *Прим. ред.*

продвинутой.) Однако работы Эйнштейна по релятивизму были революционны, поражали воображение и опирались на твердое научное основание. Они изменили жизнь и учителя.

Вскоре сам Минковский сделал огромный рывок вперед, оказав колоссальное обратное влияние на Эйнштейна. Неизбежным следствием этого влияния стало создание уравнений, на которых сегодня зиждется вся наука о Вселенной: общей теории относительности.

Уравнения Эйнштейна связали пространство и время. Он доказал математически, что время события зависит не только от времени в другой системе отсчета, но и от его расположения в пространстве. Минковский взял уравнения Эйнштейна и сделал с ними то, что могло показаться неким трюком. На самом деле он основывался на глубокой идее. Минковский сформулировал теорию относительности особым образом, в котором пространство и время представляли собой координаты в пространственно-временном континууме. Чтобы добиться этого, ему пришлось сделать временную координату мнимой.

Мнимое время? Под этим я подразумеваю, что событие определяется четырьмя числами: x , y , z и it , где $i = \sqrt{-1}$ (мнимая единица), а t — время. Зачем нужно было делать такую странную вещь? Логика Минковского состояла в том, что это превращало комбинацию координат в математический объект, который мы называем *вектором* и который обладает очень полезными свойствами.

Можно решить, что превращение времени в мнимое ради математического выигрыша означает выплескивание ребенка из купели вместе с водой. Мы знаем, что время реально (вещественно). Рассматривать его как *мнимое* кажется сумасшествием. Но для физиков и математиков мнимые числа совсем не воображаемые.

Придется посмотреть понятию *мнимости* прямо в глаза, поскольку оно встречается не только в релятивизме, но и в квантовой физике, так как квантовая волна оказывается комбинацией вещественных и мнимых значений, то есть комплексным числом. Для состояний с хорошо определяемой энергией время в квантовой физике объединено с $\sqrt{-1}$ в показателе экспоненты, что дает график временной зависимости. Так что давайте поговорим о мнимых числах.

Нуль, иррациональные и мнимые числа

Чтобы понять, что такое мнимое время, необходимо осознавать, что термин *мнимый* используется в физике и математике в несколько ином смысле, чем в литературе и психологии. Как это ни парадоксально, но слово *мнимый* в математике просто отражает нехватку у математиков воображения. Как и физики, они любят обычными словами называть необычные явления. У них не хватает фантазии придумать новый термин, поэтому они «крадут» общеупотребимое слово и придают ему некое новое значение. Так поступают многие ученые.

Прошу извинить меня за тирады по поводу так называемого *научного языка*. Я спрашиваю, по какому праву ученый позволяет себе утверждать, что американский *буйвол*¹ — это совсем не буйвол? Или что паук не насекомое? Или что Плутон не планета? Ученые пытаются «похитить» эти слова, а затем диктовать нам, когда можно ими пользоваться, а когда нет. Но не они их придумывали, поэтому и не имеют права изменять границы их значений. По моему мнению, американский буйвол только и есть, что американский буйвол. В XVII веке не только пауки, но и черви, и улитки назывались насекомыми. От одного математика я услышал, что на шнурах своих ботинок я завязываю *не узел*, так как все, что может быть развязано, не должно называться узлом.

Никто не давал ученым права изменять значение общепринятых слов. Одно из замечательных следствий этой логики — Плутон все-таки *планета!* Однажды я предложил студентам своего курса проголосовать за это, и с результатом 451:0 победили те, кто считает Плутон планетой. Поскольку участников того голосования было больше, чем на заседании Международного астрономического союза, (МАС)², вынесшем

¹ Слово *buffalo*, в переводе означающее «буйвол», в США имеет несколько значений. Помимо города Buffalo в штате Нью-Йорк и реки Buffalo National River, это также род рыб семейства чукучановых (лат. *Ictiobus*); золотая монета высшей пробы (99,99%), выпускаемая в США как для инвестиций в золото, так и для коллекционеров (*American Buffalo*); хоккейный клуб Buffalo Sabres (НХЛ) и танк-амфибия. К тому же это слово в качестве глагола означает «озадачивать», «мистифицировать». *Прим. ред.*

² Международный астрономический союз (МАС; *International Astronomical Union, IAU*) — организация, объединяющая астрономические сообщества всего мира. Основан в 1919 г. в Брюсселе (Бельгия). *Прим. ред.*

противоположное решение¹, думаю, что верх все же одержали мои студенты. Никто не давал МАС полномочий решать этот вопрос. (А я, между прочим, член МАС.) Плутон — по-прежнему планета. Конец моей тираде. Вернемся к мнимым числам.

В моей преподавательской практике я видел немало хороших и умных студентов, терпение которых лопалось, когда начиналось изучение мнимых чисел. Как можно работать с тем, чего нет? При встрече с мнимыми числами практически у всех возникает ощущение, что такая математика становится слишком абстрактной, чересчур оторванной от реальности, чтобы ее можно было понять.

В духе отрицания пресловутого «научного языка» я объявляю, что мнимые числа совсем не воображаемые. Квадратный корень из -1 ($\sqrt{-1}$) в действительности существует. Чтобы понять, каким образом, давайте посмотрим на другие абстрактные числа. Существует ли 0 ? Древние римляне говорили, что нет. Они полагали самоочевидным, что *ничто* не может существовать. Как итог — в римских цифрах нет нуля. Римлянин, записывающий вычитание IV из IV, в качестве результата просто оставлял пустое место. Но как пустое место в качестве результата отличить от нерешенной задачи? Идея использования символа, обозначающего *ничто*, была бы для римлян слишком большим шагом вперед, который они так и не сделали (если только вы не считаете Птолемея римлянином). Предполагаю, что в то время некоторые математики (или, может быть, счетоводы) настаивали на введении такого символа: просто он был бы полезен. Но концептуально римлянам трудно было принять обозначение символом того, что было *ничем*. Ноль (0) ведь в реальности не существует, не так ли? Ведь он есть только в нашем воображении, правильно? Он ведь *мнимый*, верно?

Древние греки были на удивление более продвинутыми в математике. Архимед вывел формулу объема шара: $\frac{4}{3}\pi R^3$. Попробуйте вывести ее самостоятельно без дифференциальных вычислений. И все же даже у греков

¹ Решением 26-й Ассамблеи МАС (2006) Плутон был исключен из разряда планет. Планетой было решено считать тело, которое, наряду с прочими критериями, «вычищает» пространство на своей орбите. То есть кроме самой планеты и ее спутников, на гелиоцентрической орбите других тел находиться не может. Для Плутона это условие не выполняется, поэтому он был официально исключен из числа «настоящих» планет и отнесен к карликовым планетам. *Прим. ред.*

не было знака для обозначения нуля, по крайней мере до 130 года н. э., когда Птолемей в Александрии ввел его в ограниченное употребление. Греки, как и римляне, оставляли на месте нуля пустое место.

Когда моей дочери было пять лет, мы нередко развлекались незатейливой игрой. Я спрашивал: «Кто на заднем сиденье машины?» Она отвечала: «Никто». — «У этого “никого” окно открыто?» — «Нет». — «Но у меня то окно открыто. Как же ты можешь говорить, что окно не открыто ни у кого?» «Папа!» — возмущалась дочь. И несмотря на свое расстройство, продолжала игру в слова. Это занятие ей нравилось, но она тогда еще не понимала, что я готовлю ее к абстрактной математике.

А как насчет отрицательных чисел? Вспоминаю учительницу математики в седьмом классе (она была самым плохим педагогом за всю мою жизнь), которая говорила, что отрицательных чисел не существует. «Просто притворитесь, что они есть», — твердила она. К счастью, я был довольно развитым учеником и поэтому решил, что она ошибается. Помню, как убеждал себя: «*Отрицательное число похоже на то, что ты кому-то должен*». Однако, полагаю, ее совет по поводу отношения к отрицательным числам знаменовал собой конец математики для половины класса. Многие мои соученики никогда больше не испытывали комфорта, производя операции с числами, которых не было. Для меня отрицательные числа существовали всегда.

В седьмом классе я уже сделал для себя вывод: числа не вещи, а мысленные категории, полезные при вычислениях. Существует ли какое-либо число в реальности? Или это просто абстракции, которые мы используем, чтобы правильно организовывать свои мысли? Вообще-то это *философский* вопрос, имеющий отношение к сути существования: им переполнены книги и статьи. (На моем рабочем столе оказалось издание под названием *Does Santa Exist?*¹ Эта серьезная книга раскрывает смысл слова «существовать».) Мы вернемся к этому при обсуждении некоторых новых идей в физике, которые могут или не могут *существовать*. Одной из них будет квантовая волновая функция. Другой — радиус Шварцшильда для черных дыр.

¹ Издана на русском языке: Каплан Э. Санта действительно существует? Философское расследование. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2015. *Прим. ред.*

Древние греки верили (именно верили), что существуют только целые числа. Они считали эту истину очевидной. Греки думали, что все остальные числа могут быть записаны как дроби, или отношения целых чисел, например $22/7$. Пифагора считают открывшим такие отношения в музыке: это тоны. «Октава» означает, что соотношение частот между соседними звуками составляет 1:2 (на длине вибрирующей струны). Этот музыкальный интервал называется октавой¹ потому, что включает в себя восемь нот. Музыкальный интервал квинта² шириной в 5 нот имеет соотношение частот рядом расположенных звуков, равное 3:2. Кварта³, музыкальный интервал в 4 ступени, имеет соотношение 4:3.

И вот, примерно в 600 году до н. э., произошло поразительное событие — не только в истории математики, но вообще в сфере понимания человечеством окружающего мира. Пифагорейцы открыли, что $\sqrt{2}$ не может быть записан как отношение целых чисел. В результате они назвали это число *иррациональным*. Не рациональным. Сумасшествие.

Все это может показаться загадочной стороной математики, но подумайте об этом хорошенько. Как вообще можно быть уверенным, что ваше утверждение истинно? В конце концов, нет ничего сверхъестественного в $\sqrt{2}$: это всего лишь длина гипотенузы в прямоугольном треугольнике с длинами катетов, равными 1. Из физических измерений этой фигуры нельзя заключить, что число будет иррациональным. Вы никогда не перепробуете всех возможных комбинаций целых чисел. Предположим, я скажу, что $\sqrt{2}$ равен результату деления числа 1 607 521 на 1 136 689. На самом деле это не так, но очень близко. Попробуйте сами: произведите эту операцию на калькуляторе, а потом возведите результат в квадрат. Или используйте таблицу.

Открыв иррациональный характер $\sqrt{2}$, пифагорейцы сделали важный шаг к признанию реальности ненаучного знания. Я привожу доказательство иррациональности $\sqrt{2}$ в Приложении 3. Это не очень трудно — можете убедиться сами. Позже мы поговорим подробнее о квадратном корне из 2, а сейчас давайте продолжим наше исследование значения термина *мнимый*.

¹ Октава — лат. *octava* от *octo* — восемь. *Прим. ред.*

² Квинта — лат. *quinta* — пять. *Прим. ред.*

³ Кварта — лат. *quarta* — четверть. *Прим. ред.*

Квадратный корень из 2 может быть представлен по крайней мере графически. Как я уже говорил, это длина гипотенузы в прямоугольном треугольнике с катетами, равными 1. Однако соотношение между длиной окружности и ее диаметром, которое мы называем в честь Пифагора числом π , нельзя представить графически. Получается, оно еще более странное, чем $\sqrt{2}$. Мы называем его *трансцендентным*, используя то же слово, которым обозначаем трансцендентальные медитации¹.

Одним из удивительных фактов, касающихся иррациональности $\sqrt{2}$ (показывающих, насколько это действительно экстраординарное явление), можно считать то, что оно было открыто всего один раз за историю цивилизации. Все другие утверждения по поводу этого числа в конечном счете возвращаются к работам древнегреческих математиков.

А что тогда можно сказать о $\sqrt{-1}$? Это не целое число, не рациональное и не иррациональное. Оно также не трансцендентное. Означает ли это, что его не существует? Нет, определенным образом оно существует, но только в такой степени, в которой реально существуют и другие числа. Они служат инструментами, которые мы используем для вычислений. Если такой инструмент (будь то 0, или -7 , или $\sqrt{2}$) полезен, пользуйтесь им. Если $\sqrt{-1}$ нет в списке странных нецелых чисел, это не означает, что его не существует. По моему мнению и по мнению физиков и математиков, это число так же реально, как и 1.

Главная проблема с мнимыми числами скрыта в самом их названии. Если бы $\sqrt{-1}$ называлось «расширенным» вместо «мнимого», возможно, оно не создавало бы таких мучений для многих поколений студентов. Или, может быть, следовало назвать его «числом E» по имени великого математика Леонарда Эйлера², который показал нам, что $e^{\pi\sqrt{-1}} + 1 = 0$. Ричард Фейнман называл эту формулу «самой замечательной в математике». Она связывает пять важнейших чисел — e (основание натурального

¹ Трансцендентальная медитация (от лат. *transcendens* — «перешагивающий», «выходящий за границы возможного», и лат. *meditatio* — «размышление», «обдумывание») — техника медитации с использованием мантр, основанная Махариши Махеш Йоги. Это динамичный процесс, в результате которого достигается состояние «спокойной осознанности». *Прим. ред.*

² Леонард Эйлер (Leonhard Euler, 1707–1783) — швейцарский, немецкий и российский математик и механик, внесший фундаментальный вклад в развитие математики, механики, физики, астрономии и ряда прикладных наук. *Прим. ред.*

логарифма, математическую константу), π , $\sqrt{-1}$, 1 и 0 — совершенно неожиданным способом, который оказывается чрезвычайно ценным и для электротехники, и для квантовой физики. Замечательно, что Эйлер впервые использовал для обозначения основания натурального логарифма букву e , которая в честь ученого называется числом Эйлера.

Вернемся к мнимому времени. Часы не могут показать $\sqrt{-1}$, на них нанесены только целые числа, по которым двигаются малая и большая стрелки. Как может время быть мнимым и даже расширенным?

Ответ состоит в том, что формулы Минковского представляют время вещественными числами — часами, минутами и секундами. Мнимо именно абстрактное *пространство-время*, постулированное Минковским. Время остается реальным, но координата в *пространстве-времени* оказывается вещественным числом t , помноженным на мнимое число $\sqrt{-1}$. Тем не менее когда физики говорят о конструкции Минковского — четырехмерном *пространстве-времени*, они рассматривают координату it в качестве мнимого времени.

Мнимое время и четырехмерное пространство-время

Самым важным вкладом Минковского в релятивистскую теорию считается не формулирование мнимого времени, а предложение концепции *пространственно-временного континуума*. Он показал, что уравнения, используемые в теории относительности для расчета координат местоположения и времени события, в новой системе отсчета могут быть представлены как повороты в пространстве-времени. Физики-теоретики нашли эту идею очень интересной. Вместо работы только с уравнениями теперь они могли представлять себе релятивистскую теорию в картинках. Да, эти картинки должны быть четырехмерными, и некоторые физики были способны вообразить их. Но большинство постарались облегчить дело и оперировать лишь одним пространственным измерением (как та линия, по которой в парадоксе близнецов Мэри двигалась от Земли к звезде) и одним временным измерением. В таком случае пространственно-временная диаграмма может быть изображена на плоском листе бумаги,

а изменение системы координат при переходе из одной системы отсчета в другую предполагало всего лишь поворот созданной диаграммы вокруг своей оси.

Важнейшее значение пространства-времени в том, что оно превратило теорию относительности из алгебраической проблемы в геометрическую. Роль Эйнштейна была колоссальна. Он занялся изучением возможности того, что все физические уравнения — только элементы сложной геометрии. Ученый начал с гравитации, потому что к тому моменту уже понял, что действие гравитационного поля эквивалентно действию ускорения. Из этого он вывел, что время течет быстрее на удалении от Земли, в сравнении с временем на ее поверхности. Могут ли быть переведены в геометрию все поля, а не только гравитационные? Как насчет электромагнетизма?

Самая замечательная работа всей моей жизни

Эйнштейн почти 10 лет работал над созданием геометрического представления о гравитации. Это был один из самых фантастических эпизодов в истории человеческой мысли. В своем завершенном труде Эйнштейн позволил пространству-времени иметь произвольную геометрию, включая искривления и растяжения. Точно так же, как на поверхности Земли имеются горы и долины, четыре измерения пространства-времени могут изгибаться и поворачиваться, сжиматься и расширяться, оставаясь при этом протяженными и целостными. Планеты и их спутники, согласно этим взглядам, просто двигались по орбите вокруг массивных тел, подчиняясь действующим на них силам и следуя тем курсом, который представлялся им «прямой линией» (они еще называются геодезическими). Старое гравитационное поле Ньютона ушло в прошлое, замененное неевклидовой геометрией, которая зависела от плотности существующей поблизости энергии (включая энергию массы).

Эйнштейну удалось найти уравнение, в котором геометрия пространства-времени определялась распределением в нем энергии. При таком подходе гравитационные силы перестают действовать. Присутствие массы означает наличие энергии; присутствие энергии искривляет пространство

и время; искривление пространства и времени означает, что объекты подчиняются силам гравитации, а на самом деле они просто двигаются вперед по сложному пространственно-временному континууму. В этом смысле планеты, обращающиеся по своим орбитам вокруг звезд, следуют по прямой линии не сквозь космическое пространство, а сквозь пространство-время.

К 1915 году Эйнштейн не только нашел свое главное окончательное уравнение, но также убедил себя (а вскоре и весь мир), что оно правильно. Это уравнение выглядит просто:

$$G = kT,$$

где $k = 2,08 \times 10^{-43}$ в стандартных физических единицах измерения (метрах, килограммах и секундах).

Это и есть уравнение общей относительности! Вся его сложность скрыта в определении понятий G и T . Сегодня величину G мы называем *тензором Эйнштейна* (метрическим тензором). Это математический объект, описывающий искривленность в зависимости от плотности пространства-времени. Что это означает? Пространство более не простое. Поскольку оно может быть растянуто и сжато, вы можете, например, «сжать» много пространства в какую-то одну небольшую область. То же самое относится и ко времени. Таким образом уравнения работают с замедлением времени. Если какая-то область пространства поблизости содержит черную дыру, вы обнаружите, что только пересечение этой дыры может потребовать от вас перемещения на бесконечное расстояние. Это как прохождение по горе: прямое движение вперед состоит из множества движений вверх и вниз. Но в теории Эйнштейна нет подъемов и спусков. Скорее, в ней открывается все большее пространство и расстояние, «сжатые» в эту область.

В приведенном выше уравнении величиной T обозначается тензор энергии-импульса¹. Уравнение связывает геометрию локального

¹ В этой формулировке уравнения не только пространство, но и энергия состоит из четырех компонентов. Энергия включает в себя собственно энергию и три компоненты импульса. T называют «тензором энергии-импульса», однако для простых слабых полей это всего лишь соотношение энергия / плотность массы.

пространства-времени с наличием в нем энергии, которая выражается величиной T .

На самом деле при определенной константе G и T всегда равны. Для пустого пространства $G = 0$, хотя это и не означает, что пустое пространство имеет простую геометрию. Это означает только, что искривления в таком пространстве относительно незначительны. Уравнение Эйнштейна говорит не только о гравитации Земли или Солнца, но и о гравитационных силах вокруг черных дыр и вообще во Вселенной. В этом уравнении может быть скрыта возможность того, что Вселенная и конечна, и бесконечна; что пространство может расширяться и сокращаться; а время, существующее внутри черных дыр, соответствует бесконечности вовне (см. следующую главу).

Наверное, самое замечательное в открытиях Эйнштейна — это возможность за счет сжатия и растяжения времени и пространства придавать объектам ускорение даже несмотря на то, что их местоположение не меняется. Сидя на поверхности Земли, вы (в геометрии Эйнштейна) постоянно ускоряетесь вертикально вверх, хотя и не двигаетесь. Это вертикальное ускорение, направленное вверх, мы называем гравитационной силой Земли, и именно это ускорение может рассматриваться в качестве причины возникновения гравитационного эффекта замедления времени.

Многие ложно полагают, что сжатие свободного пространства между объектами требует пятого измерения, в дополнение к известным четырем. Они ошибочно представляют себе это дополнительное пространство в качестве какой-то структуры, похожей на гору, которая как-то искривляется в пятом измерении, удлинняя более короткий путь. Такое пятое измерение может существовать, но математике оно не нужно. Пространство не твердый объект: количество пространства в этой области не фиксированно. Не нужно воображать себе какое-то внешнее измерение, чтобы описать сложную геометрию теории относительности. Достаточно, чтобы вы признавали: расстояния и временные интервалы могут быть изменчивы, как это было в специальной теории относительности (СТО) 1905 года. Даже в соответствии со СТО 12-метровый шест можно было «загнать» в 6-метровый сарай, используя понятие о сжатии пространства (по крайней мере, теоретически), без какого-то скрытого измерения, благодаря которому можно было бы «сложить» шест.

Очень примечательно, что из уравнений общей теории относительности исчезло мнимое число $\sqrt{-1}$. В конечном счете Эйнштейн нашел путь (и сам разработал его) рассматривать пространство-время, не прибегая к мнимым числам. Он исключил $\sqrt{-1}$ не потому, что счел это число несуществующим (оно существует). Эйнштейн отыскал другой подход, который использует неевклидову геометрию Римана¹ и в результате которого его уравнения и вычисления стали более элегантными, мощными, легко применимыми и легко понимаемыми.

Для слабых гравитационных полей, таких как гравитационное поле нашего Солнца (черные дыры имеют сильные гравитационные поля), уравнения Эйнштейна не отличались от гравитационных уравнений Ньютона. Он вывел, что гравитационное ускорение массы M выражается уравнением $a = GM/r^2$ (согласно закону всемирного тяготения). Ньютоновское уравнение было всего лишь приближением (хотя и очень хорошим) в сравнении с более точным уравнением Эйнштейна в его общей теории относительности. Нильс Бор², один из основателей (наряду с Эйнштейном) квантовой физики, позже назвал это свойство научных теорий *принципом соответствия*³. Новые теории должны давать такие же результаты, как и старые, в тех областях, в которых прежние научные воззрения были успешными. Для общей теории относительности это распространялось на малые скорости и относительно небольшие силы гравитации.

Однако между новой теорией гравитации и старой теорией Ньютона существовали и различия. С помощью своих новых уравнений в 1915 году

¹ Геометрия Римана — одна из неевклидовых геометрий, основанная на аксиомах, отличающихся от аксиом евклидовой геометрии. У Римана прямая, например, считается замкнутой линией, поэтому вопросы расположения точек на прямой нельзя рассматривать с помощью понятия «лежать между». *Прим. ред.*

² Нильс Бор (1885–1962) — датский физик-теоретик и общественный деятель, один из создателей современной физики. Лауреат Нобелевской премии по физике (1922). Автор первой квантовой теории атома, активный участник разработки основ квантовой механики. Внес значительный вклад в развитие теории атомного ядра и ядерных реакций, взаимодействия элементарных частиц со средой. *Прим. ред.*

³ Принцип соответствия в методологии науки сформулировал Н. Бор в 1923 г. Это утверждение, что любая новая научная теория при наличии старой, хорошо проверенной теории находится с ней не в полном противоречии, а дает те же следствия в некотором предельном приближении (частном случае). *Прим. перев.*

Эйнштейн рассчитал, что орбита планеты Меркурий при движении вокруг Солнца должна представлять собой не простой эллипс, а эллипс с постепенно наклоняющейся осью вращения. Вычисления Эйнштейна помогли разрешить загадку аномального явления, которое было открыто за 50 лет до этого и не поддавалось объяснениям. Было установлено, что орбита Меркурия изменяет наклон. Феномен получил название «аномальное смещение перигелия Меркурия». Из уравнений общей теории относительности вытекало именно такое значение смещения, которое наблюдалось. Оказались не нужны никакие поправки или дополнительные вычисления. В этом случае теория Эйнштейна не предсказала что-то, а постфактум точно объяснила явление, известное науке с 1859 года.

Мне трудно представить, что должен был испытать Эйнштейн, впервые рассчитав орбиту Меркурия с помощью своих уравнений и получив результат, который идеально соответствовал хорошо известному, но непонятному до тех пор смещению. Если быть абсолютно точным, то к этому итогу великий ученый пришел в 1913 году в сотрудничестве с Михаэлем Бессо. В письме своему другу Гансу Альберту Эйнштейн писал: «Я только что закончил самую замечательную работу в моей жизни». Это уникальное заявление для человека, который уже создал специальную теорию относительности, своей интерпретацией броуновского движения доказал, что атомы существуют, и создал основу для квантовой физики работами по фотоэффекту.

В своих статьях 1915 года (через год собранных в историческую работу об общей теории относительности) Эйнштейн сделал еще два гениальных предсказания. Он утверждал, что свет звезд, проходящий в непосредственной близости от Солнца, под действием гравитации будет иметь отклонение в его сторону, равное приблизительно 1,75 угловой секунды¹. Через несколько лет английский физик Артур Эддингтон, которого я часто упоминаю, блестяще подтвердил это предсказание, осуществив сложные экспериментальные измерения при полном затмении Солнца.

¹ Угловая секунда используется в астрономии при измерении плоских углов в градусных мерах (в 1 градусе 60 минут, в 1 минуте 60 секунд). Одна угловая секунда примерно соответствует углу, под которым виден футбольный мяч с расстояния около 45 км. *Прим. ред.*

Это подтверждение теории Эйнштейна вознесло его на вершину мировой славы. Экспериментальное доказательство гипотезы Эйнштейна о том, что на больших высотах время течет быстрее, потребовало много времени и было сделано Паундом и Ребкой спустя 44 года после ее постулирования.

Пространство-время

После того как Минковский и Эйнштейн представили миру концепцию пространства-времени, многие другие физические явления стали легко объясняться при подходе к ним с позиций четырехмерного пространственно-временного континуума. Энергия и импульс (количество движения), которые ранее рассматривались как связанные, но отдельные понятия: три компоненты классического вектора импульса, имеющие направления x , y и z , стали составными частями 4D-вектора энергии-импульса, а четвертой компонентой оказалась полная энергия. Эйнштейн «соединил» импульс и энергию в том же смысле, в котором (он и Минковский) соединил пространство и время.

Другие физические понятия также красиво вписались в четырехмерную модель. Больше не считались отдельными феноменами электрические и магнитные поля: они стали просто разными компонентами четырехмерных объектов — тензоров. Удивительным оказалось и такое открытие: если перевернуть координаты этих объектов, электрическое поле можно было превратить в магнитное, и наоборот. Математика такого поворота в своей основе напоминала преобразования Лоренца/Эйнштейна. На формировавшемся тогда научном жаргоне это явление получило название релятивистской ковариантности¹. Подобные повороты математически эквивалентны классическим уравнениям Максвелла, относящимся к электрическим и магнитным полям. Тем самым уравнениям, которые использовались для создания электромоторов и электрогенераторов.

¹ Ковариантность (от лат. *co* — совместно и *varians* — изменяющийся) — форма записи физических величин и уравнений, непосредственно отражающая характер их изменения (векторный, спинорный, тензорный и т. д.) при преобразованиях системы пространственно-временных координат. *Прим. ред.*

Тем временем Эйнштейн продолжал свои поразительно продуктивные разработки. Вскоре после создания первых трудов по общей теории относительности он написал несколько работ по радиационному излучению, в которых предсказал прежде не известное явление — *вынужденное*, или индуцированное, *излучение*. Это привело в 1954 году к изобретению лазера известным американским физиком Чарльзом Таунсом¹ и советскими физиками Николаем Басовым² и Александром Прохоровым³. Собственно, слово «лазер» — это английская аббревиатура: L.A.S.E.R., light amplification by stimulated emission of radiation — «усиление света посредством *вынужденного излучения*».

Эйнштейн считал свою специальную теорию относительности, опубликованную в 1905 году, первым шагом на пути к пониманию всей физики через геометрию. С помощью принципа эквивалентности он включил в СТО гравитацию, создав общую теорию относительности — геометрическую теорию тяготения. И не собирался на этом останавливаться. Эйнштейн хотел сделать электромагнетизм геометрической теорией, так же как он поступил с гравитацией, и объединить теорию электромагнетизма излучения с общей теорией относительности. В 1928 году он начал писать ряд статей, посвященных «единой теории поля», с помощью которой планировал добиться своей цели. Сегодня многие ученые считают, что в конечном счете Эйнштейн пошел по неверному пути; возможно, потому что в свои исследования не включил квантовую физику, которую сам же некогда помог создать.

С принятием квантовой физики многие теоретики верят, что приблизились к решению задачи создания единой теории, хотя она и не основана

¹ Чарльз Таунс (1915–2015) — американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике (1964). Член Национальной академии наук США (1956), иностранный член Российской академии наук. Основные труды Таунса посвящены радиоспектроскопии, квантовой электронике и ее приложениям, нелинейной оптике, радиоастрономии. *Прим. ред.*

² Николай Басов (1922–2001) — советский физик, лауреат Нобелевской премии по физике (1964). Дважды Герой Социалистического Труда. Работы Басова посвящены квантовой электронике и ее применениям. *Прим. ред.*

³ Александр Прохоров (1916–2002) — советский физик, один из основоположников квантовой электроники, лауреат Нобелевской премии по физике (1964). Работы Прохорова посвящены радиофизике, физике ускорителей, радиоспектроскопии, квантовой электронике и ее приложениям, нелинейной оптике. *Прим. ред.*

на геометрическом подходе. Этот подход, названный *теорией струн*, объединяет общую теорию относительности и квантовую физику, сводя в один предмет изучение силы гравитации, электричества и магнетизма; «слабые» взаимодействия, которые вызывают радиоактивный распад; и «сильные» взаимодействия, которые удерживают протоны и нейтроны в ядре, несмотря на существующие между ними гигантские силы отталкивания.

Теория струн вызвала в научной среде большой энтузиазм. На эту тему появилось много популярных изданий. По моей оценке, эта теория не стала тем решением, которое мы ищем. На ее основе сделано много предсказаний (насчет существования новых частиц), которые пока не подтверждаются. С другой стороны, теория струн не предугадала многих явлений, оказавшихся реальностью. Некоторые ученые утверждают, что самым убедительным доказательством правильности можно назвать ее математическую последовательность и отсутствие произвольных (и трудных для оправдания) вычислительных хитростей ради избежания бесконечностей, присутствующих в классической квантовой физике. Некоторые говорят, что величайшим достижением теории струн стало ее «предсказание существования гравитации». Разумеется, гравитация была известна задолго до возникновения этой теории. Однако «предсказание» отражает то, что теория струн *нуждается* в существовании относительно слабых (в сравнении с другими силами) гравитационных полей.

* * *

Даже без каких-либо теоретических дополнений вскоре после публикации работ Эйнштейна удивительные явления были обнаружены в самой общей теории относительности. Эта теория может быть применена по отношению и к Вселенной, и к очень плотным объектам. По мнению Роберта Оппенгеймера¹, будущего научного руководителя

¹ Роберт Оппенгеймер (1904–1967) — американский физик-теоретик, профессор физики Калифорнийского университета в Беркли, член Национальной академии наук США. Научный руководитель Манхэттенского проекта. Внес важный вклад в современную теорию нейтронных звезд и черных дыр, а также в решение отдельных проблем квантовой механики, квантовой теории поля и физики космических лучей. Пропагандист науки, отец-основатель американской школы теоретической физики, получившей мировую известность в 30-е гг. XX в. *Прим. ред.*

Манхэттенского проекта и «отца» атомной бомбы, черная дыра создается, когда исключительно тяжелая звезда подвергается коллапсу. Действительно, существует мнение, что ближайшая к Земле черная дыра находится «всего лишь» (по оценкам астрономов) на расстоянии 6000 световых лет от нашей планеты. Теоретическое изучение черных дыр заставило по-новому взглянуть на время. Этот новый взгляд бросает вызов многим врожденным предубеждениям.