

АЛЕССАНДРО
РУССЕЛЬ

ВЕЛИКИЕ ЗАКОНЫ ВСЕЛЕННОЙ

ОТ ГРАВИТАЦИИ
К КВАНТОВЫМ
ЧАСТИЦАМ

ВИЗУАЛЬНЫЙ ГИД



БОМБОРА
ИЗДАТЕЛЬСТВО



**LES
GRANDES LOIS
DE L'UNIVERS**


**DE LA GRAVITATION
AUX PARTICULES
QUANTIQUES**

Alessandro Roussel

ВЕЛИКИЕ ЗАКОНЫ ВСЕЛЕННОЙ

**ОТ ГРАВИТАЦИИ
К КВАНТОВЫМ
ЧАСТИЦАМ**

Алессандро Руссель

 **БОМБОРА**
ИЗДАТЕЛЬСТВО
Москва

УДК 524
ББК 22.632
Р89

Les Grandes Lois de l'Univers: De la gravitation aux particules quantiques
Alessandro Roussel

© 2023, Editions Leduc, 76 boulevard Pasteur, 75015 Paris — France Published by arrangement
with Lester Agency & Associates

Руссель, Алессандро.
Р89 Великие законы Вселенной: от гравитации к квантовым ча-
стицам. Визуальный гид / Алессандро Руссель. — Москва : Эксмо,
2024. — 192 с. : ил. — (Подарочные издания. Миссия «Космос»).

ISBN 978-5-04-198892-0

Что можно увидеть на краю черной дыры? Как проследить движение звезд?
Почему гравитационные волны изменяют пространство-время? Из чего состоит
материя и какие силы действуют на нее на фундаментальном уровне?

Популяризатор науки, физик и математик Алессандро Руссель рассказывает
в своей книге:

- о теории гравитации Ньютона, специальной и общей теории относитель-
ности Эйнштейна, понятии пространства-времени Минковского и гравитацион-
ных волнах;
- о квантовой механике и стандартной модели элементарных частиц;
- о теории струн и суперсимметрии.

Все ключевые концепции современной физики — от Ньютона и Эйнштейна
до Шрёдингера и Хокинга — объяснения теории с красивыми иллюстрациями.

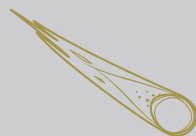
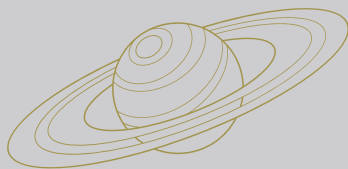
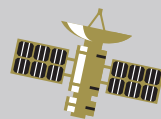
УДК 524
ББК 22.632

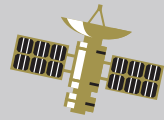
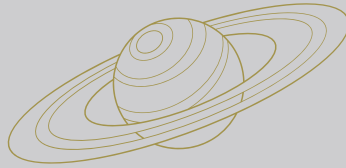
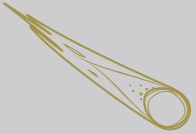
ISBN 978-5-04-198892-0

© Попов Р.С., перевод на русский язык, 2024
© Оформление. ООО «Издательство «Эксмо», 2024



Оглавление







ВСЕЛЕННАЯ В КРУПНОМ МАСШТАБЕ



1	Специальная теория относительности	19
2	Пространство-время	29
3	Гравитация по Ньютону	37
4	Самая удачная мысль Эйнштейна	45
5	Общая теория относительности	51
6	Гравитационные волны	63
7	История Вселенной	71
8	Черные дыры	79

НА КАРТИНКАХ

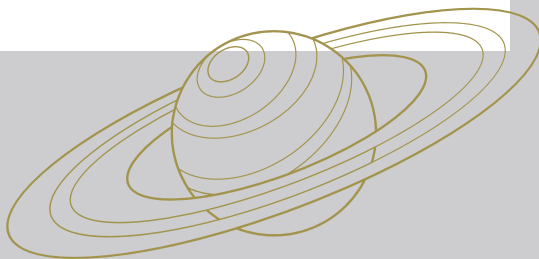
ВСЕЛЕННАЯ В КРУПНОМ МАСШТАБЕ

Как визуализировать общую теорию относительности?	58-61
Другие следствия общей теории относительности	68-69
История Вселенной	76-77
Как выглядит черная дыра?	84-89
Что происходит в черной дыре?	86-87



КВАНТОВЫЙ МИР

9	Стандартная модель	91
10	Суперпозиции и вероятности	99
11	Проблема измерения	111
12	Ряд квантовых странностей	121
13	Квантовые поля	131
14	Квантовые взаимодействия	139

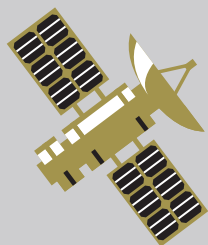


НА КАРТИНКАХ КВАНТОВЫЙ МИР

Стандартная модель частиц	96-97
Различные интерпретации	118-119
Применение на практике	128-129
Четыре вида взаимодействий во Вселенной	146-147

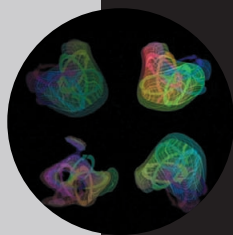
НА ПУТИ К ЕДИНОЙ ТЕОРИИ?

15	Симметрии, универсальная формальная система	151
16	Суперсимметрия	161
17	Квантовые черные дыры	167
18	Теория струн и другие подходы	173
	Заключение	185
	Благодарности	187



НА КАРТИНКАХ НА ПУТИ К ЕДИНОЙ ТЕОРИИ?

Симметрии-пространства времени	158
Симметрии квантовых полей	159
Мир струн	178-179
Петлевая квантовая гравитация	180-181
Другие подходы к квантовой гравитации	182-183



Введение



ВЕЛИКИЕ ЗАКОНЫ ВСЕЛЕННОЙ: ОТ ГРАВИТАЦИИ ДО КВАНТОВЫХ ЧАСТИЦ

Какое амбициозное название для своей первой книги! Прежде чем вы приступите к чтению, я бы хотел сказать несколько слов о том, почему я вообще взялся за ее создание.

Меня, как и многих других, с юных лет пленила популярная наука. На мое поколение оказали влияние самые разнообразные источники информации, будь то детская литература или телевидение. Достаточно вспомнить «Жил-был человек», «Прогулки с динозаврами» и, конечно же, непревзойденную передачу «Занимательно обо всем».

Я рос в творческой семье, поэтому с самого раннего возраста у меня был доступ к соответствующему оборудованию: музыкальным инструментам, компьютеру, программам для работы с изображениями и видео. Мой дедушка преподавал естественные науки в начальной школе в Италии и постоянно демонстрировал мне простые эксперименты.

В 2009 году я открыл для себя YouTube: сайт тогда еще только зарождался, но уже обладал огромным потенциалом. Я разместил там несколько крайне скромных видеороликов и даже не представлял, что вскоре эта платформа изменит мою жизнь.

Пока я учился в старших классах, в кинематографе на первый план вышли физика и математика: появились фильмы «Гравитация», «Интерстеллар», «Игра в имитацию» и «Вселенная Стивена Хокинга». Мой интерес к науке только рос, и когда я открыл для себя книгу Хокинга «Краткая история времени», то бесповоротно увлекся фундаментальной физикой.

Однако физика за партой была куда менее привлекательной. Однажды на уроке я так и не понял, что такое эффект Доплера, а потом наткнулся на видео, где это явление объяснялось в картинках. Наконец-то все стало ясно! В тот самый момент я осознал силу изображений: простая

анимация иногда действует лучше многочасовых уроков. Именно с этой мыслью в 2014 году я начал вести YouTube-канал ScienceClic и опубликовал свое первое видео под названием «Эффект Доплера за 2 минуты».

Но по мере создания видеороликов я быстро понял, что мои возможности ограничены. Прежде чем открывать новые горизонты в деле популяризации физики, мне нужно было лучше освоиться в сложных теориях, которые я пытался объяснить. После выпуска я поступил в университет Париж VI, где получил степень бакалавра по математике и физике, а затем продолжил обучение в Англии и стал магистром теоретической физики. В Кембриджском университете я увлекся общей теорией относительности и черными дырами. Вдохновившись фильмом «Интерстеллар», я даже попытался смоделировать внешний вид этих экстремальных явлений с помощью программ с заложенными уравнениями теории относительности — некоторые из получившихся изображений вы найдете в книге.

В 2020 году, после успеха ScienceClic и преодоления рубежа в 300 000 подписчиков, я решил сделать следующий шаг и полностью посвятить себя YouTube-каналу: мне хотелось использовать полученные знания в целях популяризации современных теорий без ущерба фактам. Передо мной открылись новые возможности, в том числе и шанс исполнить одно из моих детских желаний — написать книгу. Эта задача оказалась весьма непростой, ведь в книге нельзя использовать анимацию, в отличие от привычного мне видеоформата... Мне придется иллюстрировать теории аналогиями, историями и зарисовками, которые, надеюсь, помогут вам разобраться в сложных законах нашего мира.

Но, прежде чем перейти к насущным вопросам, давайте немного поговорим о теме этой работы — теоретической физике.

ЗАЧЕМ НУЖНА ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА?



Возьмите яблоко, выйдите на улицу, вытяните руку и попросите любого прохожего спрогнозировать, как яблоко будет двигаться, если вы его отпустите. Он обязательно скажет, что яблоко упадет, и будет прав. Но откуда он это знает?

Более или менее осознанно мы все понимаем, что Вселенная ведет себя совсем не произвольно. По всей видимости, объекты подчиняются

ВВЕДЕНИЕ

неким законам. В течение всей жизни мы познаем мир с помощью органов чувств: наш мозг учится лучше анализировать то, что нас окружает, и предвидеть последствия наших действий.

«Если я уроню яблоко, оно упадет».

«Если я суну руку в огонь, будет больно».

«Чем сильнее я ударю по мячу, тем дальше он полетит».

Все эти законы, которые наш разум выводит из повседневного опыта, составляют исходный фундамент для понимания и постижения мира — это и есть интуиция. Но интуиция часто бывает неполной, приблизительной или даже неточной. Она постоянно дополняется и совершенствуется по мере того, как мы сталкиваемся с новыми явлениями, которые ей не поддаются. Кто не удивлялся при виде взмывающего в воздух воздушного шара, наполненного гелием?

Интуиция как качественная характеристика заслуживает конкретизации при помощи математики, то есть строгого и менее двусмысленного языка. Именно здесь на помощь приходит теоретическая физика. Ее цель — разработать модели, которые описывают и прогнозируют работу всех систем нашей Вселенной. Не нужно быть экспертом в физике, чтобы догадаться, что яблоко упадет, если я его отпущу, но математические модели позволяют предсказать его точное движение в каждый момент времени. Такое было бы трудно проверить с помощью простой интуиции!

В поисках все более строгих описательных средств ученые постепенно пришли к углубленному пониманию Вселенной, им удалось обнаружить механизмы, потаенные проявления которых порой оказывались совершенно неожиданными.

На заре XX века все стало развиваться куда более стремительно...

СОВРЕМЕННАЯ ПАРАДИГМА: ДВЕ УСПЕШНЫЕ, НО НЕСОВМЕСТИМЫЕ МОДЕЛИ



Два века назад, в самый разгар промышленной революции, физикам казалось, что они узнали о законах Вселенной всё. Их математические теории будто бы идеально описывали все повседневные явления — от

термодинамики до электромагнетизма. Лишь две небольшие области по-прежнему оставались неясными.

С одной стороны, ученые не могли понять, почему свет ведет себя иначе, чем другие тела. Его скорость представлялась им инвариантной*, то есть одинаковой независимо от измеряющего ее наблюдателя, и эту загадку было необходимо решить.

С другой стороны, были предприняты попытки описать излучение нагретых тел: например, свечение нити накала лампочки. Математические расчеты того времени выдавали абсурдные результаты, и объяснить это явление не получалось.

Чтобы разобраться с обеими проблемами, пришлось полностью пересмотреть имеющиеся знания и рассмотреть новые гипотезы. В течение XX века две задачи постепенно прояснились, что привело к появлению величайших теорий современной физики: общей теории относительности и квантовой физики. Обе модели предложили ранее невиданный взгляд на мир, куда более глубокий и точный. Перемещаясь от атомов к крупнейшим галактикам, мы можем исследовать, предугадывать и изучать тайны Вселенной в любом масштабе. Именно на этих двух столпах сейчас зиждется наше представление о мире — само собой, каждому из них будет посвящен отдельный раздел книги.

Но все равно остается одна загвоздка: парадигмы общей теории относительности и квантовой физики непримиримы. Эти разделы науки будто бы описывают два совершенно разных подхода, а потому стоит задача согласовать их. Парадоксальное состояние современной физики заключается в том, что ее взгляд на мир все еще фрагментарен, а собранные знания невероятно точны, но принципиально несовместимы. Мы рассмотрим этот вопрос в третьем, заключительном разделе.



* До опытов Майкельсона и Морли (1881, 1887) существовало несколько версий «теории эфира», в которых скорость света в вакууме (а мы говорим именно о ней — в других средах она может изменяться) могла быть различной. После публикации результатов опытов эти теории были поставлены под сомнение, а по выходе в 1905 году работы Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел» теоретическая физика действительно перешла к постулированию инвариантности скорости света и отбросила «эфирные» теории. То есть нельзя сказать, что скорость представлялась всем инвариантной, такого консенсуса в физике не было до теории относительности. — *Прим. науч. ред.*

ВВЕДЕНИЕ

Конечно, представленная книга не претендует на исчерпывающую полноту (для объяснения всех современных теорий потребовался бы не один том), но в ней я пытаюсь набросать панораму актуальных знаний и прояснить основные концепции, которые помогут вам понять нашу Вселенную. Насколько это возможно, я пробую объяснить стоящие перед наукой вызовы, ее перспективы, а также пределы. В конце концов, несмотря на всю свою развитость, современная наука все еще находится в зачаточном состоянии, а самые великие открытия вполне могут ждать нас впереди. Как мне кажется, именно поэтому наши поиски оказались столь увлекательными!

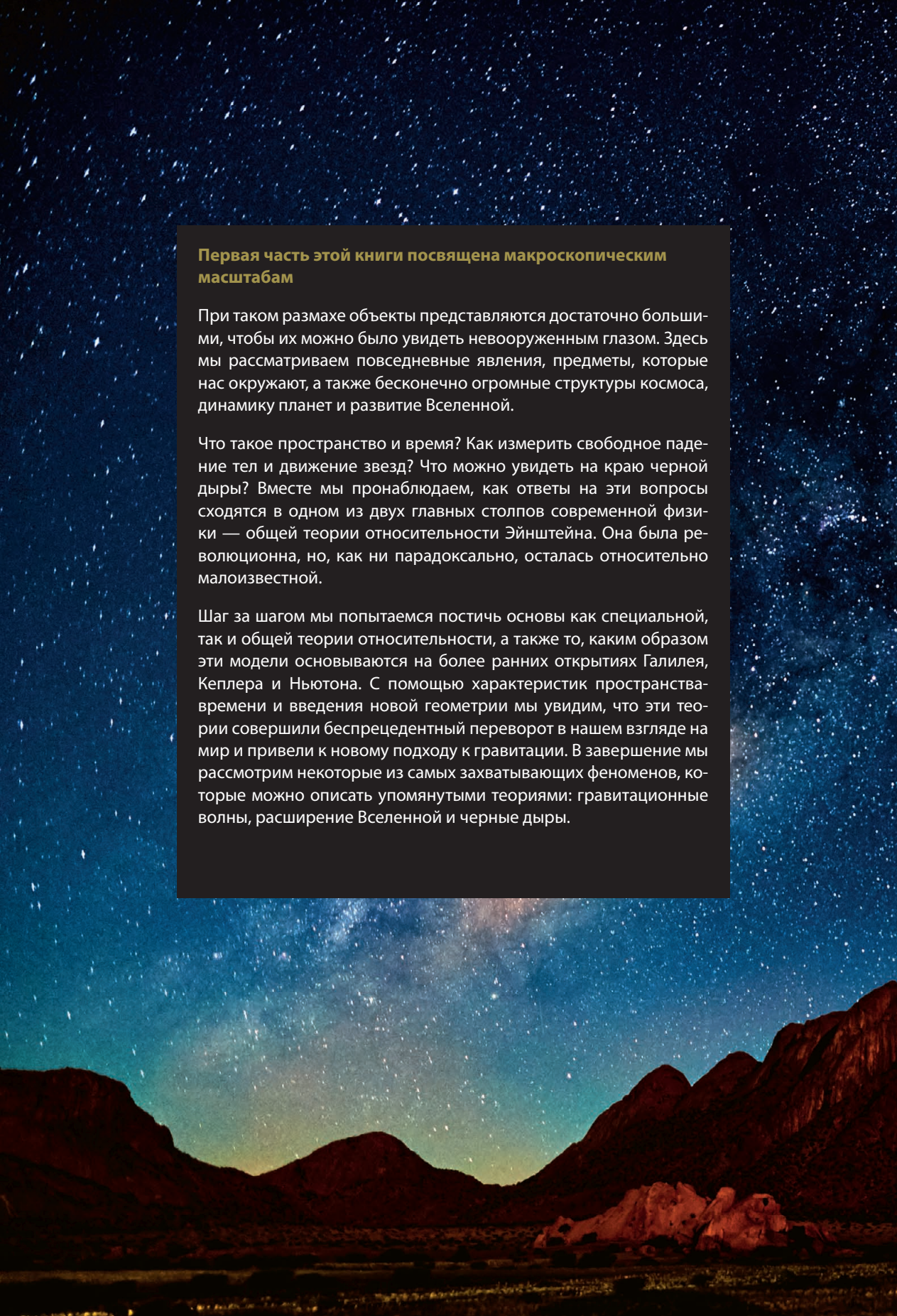
Я приглашаю вас отправиться в удивительное путешествие в мир физики: от Галилея до Хокинга, по работам Ньютона, Шрёдингера и, разумеется, вездесущего Эйнштейна. Вы встретитесь с черными дырами, гравитационными волнами и элементарными частицами, чье странное поведение выходит далеко за рамки самых смелых научно-фантастических гипотез!





ВСЕЛЕННАЯ В КРУПНОМ МАСШТАБЕ





Первая часть этой книги посвящена макроскопическим масштабам

При таком размахе объекты представляются достаточно большими, чтобы их можно было увидеть невооруженным глазом. Здесь мы рассматриваем повседневные явления, предметы, которые нас окружают, а также бесконечно огромные структуры космоса, динамику планет и развитие Вселенной.

Что такое пространство и время? Как измерить свободное падение тел и движение звезд? Что можно увидеть на краю черной дыры? Вместе мы пронаблюдаем, как ответы на эти вопросы сходятся в одном из двух главных столпов современной физики — общей теории относительности Эйнштейна. Она была революционна, но, как ни парадоксально, осталась относительно малоизвестной.

Шаг за шагом мы попытаемся постичь основы как специальной, так и общей теории относительности, а также то, каким образом эти модели основываются на более ранних открытиях Галилея, Кеплера и Ньютона. С помощью характеристик пространства-времени и введения новой геометрии мы увидим, что эти теории совершили беспрецедентный переворот в нашем взгляде на мир и привели к новому подходу к гравитации. В завершение мы рассмотрим некоторые из самых захватывающих феноменов, которые можно описать упомянутыми теориями: гравитационные волны, расширение Вселенной и черные дыры.

1 Специальная теория относительности

Все ли воспринимают время и пространство одинаково? В 1905 году сложившееся представление о мире перевернулось из-за новой теории — специальной теории относительности (СТО). Предшественница общей теории относительности (ОТО) ознаменовала собой революцию в истории науки, но все началось с простого наблюдения.



Скорость всегда зависит от системы отсчета

Законы Вселенной могут показаться непостижимыми, даже контринтуитивными. Бросьте перед собой шарик: он покатится по земле, замедлится и в конце концов остановится. Точно так же автомобилю нужна энергия для движения вперед, а без топлива он замедляется и останавливается. Неподвижность будто бы является естественным состоянием объектов. И всё же, когда вы спокойно сидите на диване, земля под вашими ногами постоянно находится в движении! Наша планета, словно юла, вращается вокруг своей оси с безумной скоростью — один оборот за 24 часа. Вы можете сидеть на диване в Париже, при этом ваш диван движется вокруг оси вращения Земли со скоростью почти 1100 км/ч!

И это еще не всё... Земля вращается не только вокруг своей оси, но и по орбите вокруг Солнца: каждый год наша планета преодолевает почти миллиард километров и движется со скоростью более 100 000 км/ч в пределах Солнечной системы! Вся Солнечная система также находится в движении: она дрейфует с бешеной скоростью в пределах нашей галактики. Может показаться, что вы сидите на диване неподвижно, но на

самом деле вы путешествуете по галактике со скоростью до миллиона километров в час!

Такая скорость просто немыслима. В буквальном смысле столь большое число невозможно себе представить, потому что подобные величины находятся далеко за пределами нашего понимания. Отчасти для этого в физике и нужна математика: с ее помощью можно описывать явления, которые наше сознание постичь не в состоянии.

Столкнувшись с такого рода утверждениями, мы имеем полное право задаться вопросом, действительно ли все это соотносится с реальным положением вещей. Почему, сидя на диване, мы не чувствуем ничего осо-

бенного? Мы летим со скоростью миллион километров в час (ее хватило бы, чтобы за секунду достичь Международной космической станции), и все же ни одно ощущение не указывает нам на этот факт...

Еще в XVII веке Галилей понял, что понятие скорости тела не имеет абсолютного значения. Скорость всегда зависит от системы отсчета: ваш диван может двигаться со скоростью 1 300 000 км/ч по отношению к определенным галактикам, но оставаться неподвижным по отношению к поверхности Земли, и ни одно из двух утверждений нельзя считать более истинным, чем другое. Нельзя сказать, что тело статично или же находится в движении: такие слова попросту не несут в себе смысла, если не указать используемую систему отсчета. Например, в поезде вы движетесь по отношению к внешней среде, но неподвижны относительно вагона. Если закрыть глаза, то, пока поезд едет прямо с постоянной скоростью, невозможно почувствовать, что он движется. Для

Куда упадет мяч?

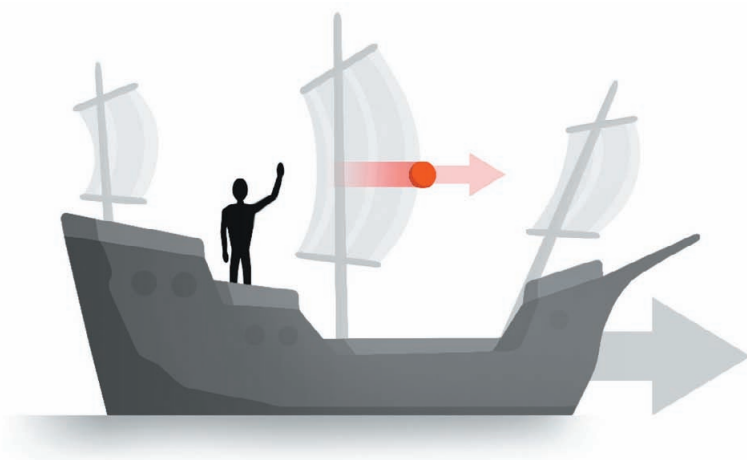
Чтобы проверить, насколько вы усвоили принцип относительности, попробуйте ответить на загадку. Вы стоите на конвейерной ленте, которая движется с постоянной скоростью. Вы подбрасываете мяч, он поднимается, замедляется, а затем падает обратно. Вопрос в том, где приземлится мяч: в вашей руке или где-то позади? Если вы проведете эксперимент, то увидите, что мяч упадет вам в руку. Все происходит так, как если бы вы были неподвижны: вы перемещаетесь относительно земли, но с вашей точки зрения неподвижной остается поверхность ленты под ногами. Иначе говоря, законы физики действуют так же, как если бы вы не двигались.

вас все происходит так же, как если бы вы стояли на месте. Подбросьте мяч вверх, и он приземлится у ваших ног. Как сказал Галилей, «движение ничего не значит»*, оно относительно: с вашей точки зрения поезд стоит на месте, но движется платформа.



Парадокс: скорость света не относительна

Представим себе следующий эксперимент. Вы стоите на палубе корабля и решаете бросить перед собой мяч. Какова будет его скорость? С вашей точки зрения, мяч просто летит по отношению к судну с той скоростью, которую вы ему задали. Но с точки зрения вашего друга, который остался на причале, объект движется быстрее: к его скорости добавляется скорость корабля. Мяч движется вдоль палубы, а сам корабль перемещается относительно причала.



Теперь представьте, что на той же палубе вы зажигаете свечу. Когда она горит, ее пламя порождает множество световых лучей, которые

* Если точнее, Галилей сказал следующее: «Для предметов, захваченных равномерным движением, это последнее как бы не существует и проявляет свое действие только на вещах, не принимающих в нем участия» (Цит. по: *Галилей Г.* Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой / Перевод А. И. Долгова. ОГИЗ Москва — Ленинград, 1948). — *Прим. науч. ред.*

пересекают пространство вокруг со скоростью света: речь идет о немислимом показателе почти в 300 000 км/с. Один из этих лучей устремляется к носовой части судна и достигает ее за доли секунды.



Скорость света

Строго говоря, скорость света зависит от среды, в которой он распространяется: например, по воздуху он разносится медленнее, чем в вакууме космоса. Однако далее по ходу книги мы будем игнорировать эту подробность, и для нас выражение «скорость света» всегда будет означать скорость в вакууме. Точное значение (299792,458 км/с) считается центральным в теории относительности. Этот показатель диктует поведение нашей Вселенной, и позже мы увидим, что он связан не только со светом...

С самого корабля кажется, что луч движется со скоростью света. Измерив время, за которое он достиг носовой части, можно вычислить, что он в самом деле перемещался со скоростью 300 000 км/с. Но что скажет ваш друг на причале? Если помните, он зафиксировал большую величину, когда вы бросили мяч, поскольку скорость мяча добавилась к скорости корабля. Но на этот раз, пронаблюдав за лучом света, ваш друг отмечает точно такой же показатель, что и вы...

Если задуматься, возникает парадокс: луч света проходит по кораблю со скоростью 300 000 км/с, но само судно движется относительно причала, поэтому ваш друг должен был измерить большую скорость. Однако он установил то же

Невозможно превысить скорость света

Представьте, что вы пытаетесь догнать луч света. Вы ускоряетесь, чтобы сократить дистанцию, но, с какой бы точки зрения вы ни смотрели, луч все равно продолжает движение с одним и тем же показателем: он удаляется со скоростью 300 000 км/с. Вы ничего не можете сделать, его никак не догнать! В каком-то смысле эти 300 000 км/с играют ту же роль, что и бесконечность при работе с числами: максимальное и непреодолимое значение больше всех возможных скоростей*.

значение, что и вы. Скорость света абсолютно одинакова независимо от того, ведется ли наблюдение с палубы или причала.

Физики впервые отметили этот парадокс в XIX веке и пришли в замешательство. Скорость света оказалась уникальной величиной: она полностью противоречила принципу относительности, установленному Галилеем несколькими столетиями ранее. Тогда произошел поворотный момент в истории науки, а понятие о постоянстве скорости света привело к серии потрясений, которые полностью перевернули наше представление о пространстве, времени и одновременности.



Эйнштейн: пространство и время относительны

Почему скорость света не подчиняется принципу относительности? После продолжительного анализа Альберт Эйнштейн в 1905 году наконец нашел ответ на этот вопрос. Его специальная теория относительности (СТО), столь простая и элегантная, имела далеко идущие последствия.

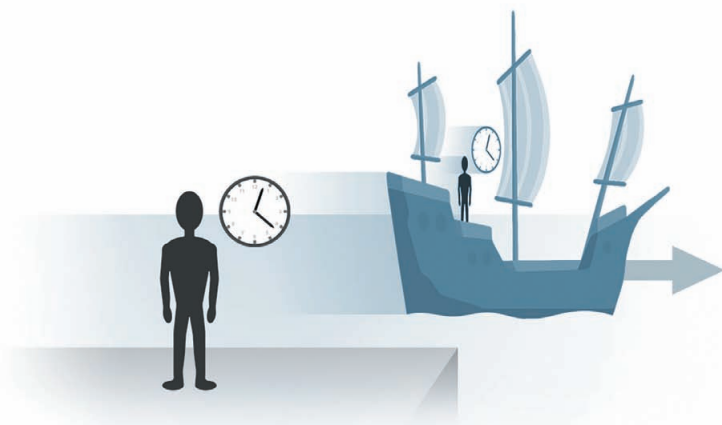
Мысль Эйнштейна заключалась в следующем: что, если время и пространство сами по себе переходят из одной системы отсчета в другую? Измерение скорости всегда обозначает ровно то же, что и измерение длины и продолжительности, то есть пройденное расстояние и затраченное

* На самом деле скорости удаления галактик больше. Скорость света, согласно современным теориям, понимается как максимальная скорость передачи информации. — Прим. науч. ред.

время. Поскольку в нашем представлении о скорости возникла загвоздка, возможно, стоит вернуться к самому определению расстояния и времени?

Чтобы лучше понять эту концепцию, давайте представим, что у вас и вашего друга есть линейка с делениями и крайне точный секундомер. Наблюдая за траекторией движения светового луча и измеряя расстояние, которое он проходит за определенный промежуток времени, можно рассчитать его скорость. Начнем с вас: когда секундомер показывает одну секунду, луч света проходит 300 000 км по вашей линейке (очень большой линейке, надо признать). Теперь обращаемся к вашему другу: когда на его секундомере проходит секунда, свет снова проходит 300 000 км, но уже по отношению к его линейке. Разница здесь чрезвычайно важна: вы оба измеряете расстояние и время, но пользуетесь каждый своими линейками и секундомерами! А поскольку скорость света не меняется от одной системы отсчета к другой, быть может, меняются именно километры и секунды? Такой ответ мог бы помочь нам справиться с задачей...

Эйнштейн понял, что линейка и секундомер вашего друга должны отличаться от ваших собственных, поэтому из-за движения на корабле ваша линейка будет казаться короче. Если бы ваш приятель измерил расстояние между двумя ее концами в заданный момент времени, то оно оказалось бы меньше, чем у его линейки. Точно так же работа вашего секундомера воспринималась бы медленнее. Здесь мы говорим о сокращении длин и растяжении времени, двух неразрывных и повсеместных явлениях во Вселенной.



На примере мюонов

На Земле эти явления трудно пронаблюдать, потому что они происходят только тогда, когда значения близки к скорости света: мчащийся по автострате автомобиль потенциально мог бы ужаться лишь на диаметр атомного ядра! Но когда некоторые космические частицы проникают в нашу атмосферу, они распадаются до образования крошечных элементарных частиц — мюонов. Не двигаясь, мюоны исчезают крайне быстро — всего за несколько микросекунд, но, так как они мчатся вперед почти со скоростью 99,5% от скорости света, в дело вступает специальная теория относительности. С нашей точки зрения, продолжительность жизни мюонов резко возрастает из-за растяжения времени — они как будто медленнее «стареют», что позволяет им достичь Земли и только потом распасться. Однако с их собственной «точки зрения», мюоны остаются неподвижными: для них со скоростью 99,5% от скорости света мимо проносятся Земля и атмосфера, и за счет сокращения длин путешествие кажется им короче. С обеих позиций теория относительности предполагает, что мюоны достигнут Земли, а затем распадутся... и действительно, их удается обнаружить!

Если принять их во внимание, проблема будет решена. Как только объект приходит в движение, его длина сжимается, а часы замедляются, с точки зрения внешнего наблюдателя. Вопреки нашей интуиции, время и пространство нельзя считать неизменными и абсолютными: они относительны. Два человека, движущиеся по-разному, не измеряют одинаковые длины и интервалы времени.

С введением обоих положений Эйнштейн наконец-то смог принять в расчет постоянство скорости света. С позиции вашего друга, находящегося на причале, корабль сжимается вдоль направления движения, становится короче, и проходящий по нему свет преодолевает меньшее расстояние. Более того, такому наблюдателю кажется, что внутренняя часть судна движется в замедленном темпе, поэтому и продвижение луча он воспринимает медленнее. Если учитывать движение корабля, скорости полностью компенсируются, и ваш друг измеряет всё те же 300 000 км/с. Парадокс разрешен.

В заключение этой главы стоит вспомнить, что простое наблюдение о постоянстве скорости света привело к головокружительным результатам.

Каждый объект во Вселенной обладает своим собственным «временем» и «пространством». Расстояния и временные интервалы не пребывают в неизменных состояниях — они относительны и подвижны, сменяясь от одной системы отсчета к другой. Все наши представления о пространстве и времени перевернулись с ног на голову, и такая смена парадигмы до сих пор подпитывает воображение писателей-фантастов. С публикацией новой теории перед физиками возникла колоссальная задача: большинство наших познаний о Вселенной нужно было пересмотреть. Отныне ученые стали основывать свои модели на новом понятии пространства и времени, которое я предлагаю рассмотреть в следующей главе.



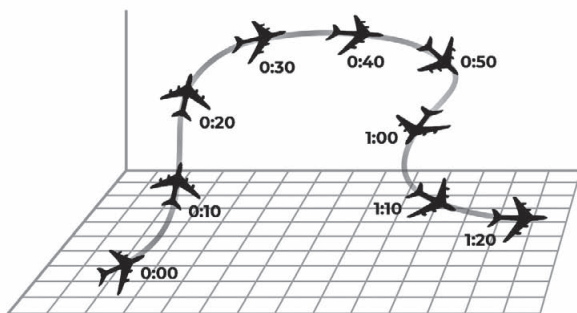
2 Пространство-время

Понятие пространства-времени, непосредственно связанное со специальной теорией относительности, поможет нам разобраться в странном воздействии растяжения времени и сокращения длин в геометрическом контексте.



Минковский: время как четвертое измерение Вселенной

Давайте ненадолго забудем про относительность и сосредоточимся на понятиях «пространство» и «время». Если бы вас попросили описать траекторию полета самолета, как бы вы поступили? Следуя традиционному подходу, необходимо определить его позицию в каждой точке, а затем изобразить получившуюся траекторию на диаграмме. Такие точки представляют положение самолета в конкретный момент времени: на получившейся диаграмме он движется в трех пространственных измерениях (ширина, высота и длина), а время мы рассматриваем как шкалу, внешний фактор, чьи изменения также учитываются.



До конца XIX века время и пространство считались абсолютными. Пространство воспринималось как огромная неподвижная сетка, а время — как нечто вроде универсальных космических часов, которые идут с одинаковой скоростью для всех. Но в 1908 году немецкий математик Герман Минковский, учитель Альберта Эйнштейна, оспорил такой взгляд на мир.

Минковский предположил, что пространство и время нельзя считать независимыми. Они составляют две грани единого целого, некоего гигантского блока, который содержит как все точки пространства, так и каждое мгновение времени: перед нами так называемое пространство-время. Значит, время оказывается таким же измерением во Вселенной, как и три пространственных. В пространстве-времени можно двигаться вверх и вниз, влево и вправо, вперед и назад, а также из прошлого в будущее! Иначе говоря, время — это четвертое измерение Вселенной. Когда вы смотрите на то, как вращаются часовые стрелки, вы на самом деле наблюдаете за своим движением в пространстве-времени: само время не идет, но вы проходите сквозь него и постоянно двигаетесь в будущее через четвертое измерение.

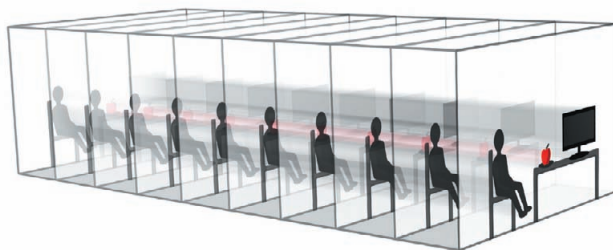


Вселенная в форме флипбука

Взглянув на мир по-новому, мы можем представить Вселенную в виде огромного блока, через который проходят траектории движения тел — мировые линии. Ваше прошлое, настоящее и будущее сплетаются вдоль отдельно взятой мировой линии, где все мгновения вашей жизни связаны воедино. На самом деле вы постоянно находитесь в движении, даже когда сидите на диване: ваша мировая линия обращена в направлении будущего!

Весьма показательным кажется сравнение с флипбуком*. Подобно такой книжке, картинки в которой будто бы оживают при быстром перелистывании, Вселенную тоже можно рассматривать как стопку сменяющих друг друга страниц, срезов различных моментов, среди которых переплетаются ваше прошлое, настоящее и будущее. Само собой, вы воспринимаете только одну страницу за раз, когда перемещаетесь в пространстве-времени.

* От англ. flip (переворачивать) и book (книга). — Прим. ред.

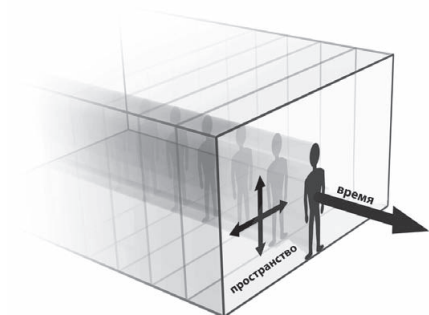


К сожалению, крайне трудно представить себе Вселенную в четырех измерениях, однако именно такое описание преобладает во всех наших современных моделях. Чтобы лучше понять сложившуюся теорию, придется пойти на хитрость: можно убрать одно измерение и вообразить Вселенную только с двумя пространственными параметрами, как в мире *Rac-Man* или любой другой двухмерной видеоигры. Так можно сформировать более ясный образ пространства-времени — блока, состоящего из всех последовательных мгновений.



Геометрический подход к специальной теории относительности: время — это направление вашей мировой линии

Когда Эйнштейн сформулировал СТО, он понял, что пространство и время относительны. Два наблюдателя, движущиеся по-разному, будут расходиться в показаниях об измеряемых ими длинах и временных промежутках. Но как согласовать его теорию с понятием пространства-времени?



Чтобы решить поставленную задачу, нужно представить, что каждый наблюдатель (например, вы или я) обладает своими собственными осями времени и пространства. В четырехмерной Вселенной время и пространство — всего лишь направления, координаты, по которым мы измеряем применимые к нам расстояния и длины.

Если говорить точнее, время представлено как траектория вашей мировой линии, направление движения, устремленное в ваше будущее. С другой стороны, пространство — это все остальные направления, перпендикулярные времени.

У каждого наблюдателя есть свой «срез», свой мировой «флипбук» и грани пространства-времени, которые мы считаем «настоящими моментами». Они не всегда совпадают: если, с моей точки зрения, две молнии ударяют в землю в один и тот же миг (то есть я воспринимаю оба события в одном и том же мировом «срезе»), то для вас удары могут произойти в разные моменты, ведь вы по-другому «нарезаете» пространство-время.

Геометрический подход ко времени как к серии срезов помогает лучше понять его растяжение, а также сокращение длин. Поскольку взгляд на длины и промежутки зависит от того, что мы называем «временем» и «пространством», два человека с различными осями естественным образом будут фиксировать такие показатели по-разному!



Часы — не что иное, как космический шагомер

Знаете ли вы, что именно измеряют часы?



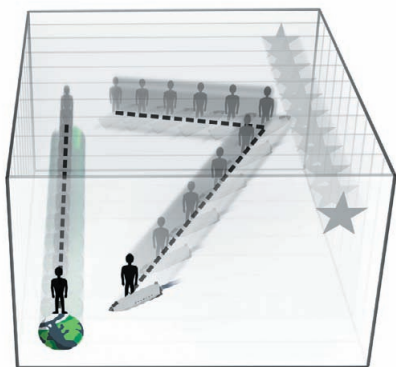
Давайте рассмотрим простую аналогию: вы с подругой идете по широкой равнине, и у каждого из вас есть браслет, который считает пройденные шаги. Ваша любознательная приятельница решает пойти более тернистой тропой: она пересекает лес, идет вдоль реки и преодолевает куда большее расстояние. Разумеется, когда

вы встречаетесь, ее шагомер показывает большее количество шагов, чем ваш.

По мнению Эйнштейна, эта ситуация аналогична представлению о том, что измеряют часы. Пространственно-временной континуум похож на обширную равнину, которую все объекты пересекают из конца в конец.

На этой равнине у каждого тела есть свои часы, которые ведут себя как шагомер: они отсчитывают пройденные «шаги» в пространстве-времени.

Иначе говоря, вращающиеся стрелки ваших часов указывают на расстояние. Часы — это космический шагомер, измеряющий движение в четырех измерениях Вселенной.



Представим себе еще одну ситуацию: вы отдыхаете на диване, а ваша приятельница садится на космический корабль и отправляется в путешествие к ближайшей звезде. Перед вылетом она тщательно синхронизирует свои часы с вашими. Но зачем? Ответ прост: ваша подруга, пока не вернется, будет стареть в другом темпе! Пространственно-временные траектории расходятся, вы пере-

мещаетесь в пространстве-времени по-разному, и ваши часы (точно как на той равнине) измеряют время неодинаково!

В 1971 году Джозеф Хафеле и Ричард Китинг взяли на борт самолета пару атомных часов, чтобы провести эксперимент. Один комплект полетел на восток, а другой — на запад. После облета вокруг света в противоположных направлениях часы сравнили и совершенно точно выявили, что они расходятся почти на 300 наносекунд!

Вернемся к нашей незамысловатой истории: подруга, улетевшая на космическом корабле, проделала более извилистый путь, чем вы. Можно предположить, что поскольку ее путешествие было длиннее, то и часы у нее тикали дольше. И все же, когда ваша подруга возвращается на Землю, вдруг выясняется, что она постарела меньше вас! За этим парадоксом кроется вся странность нашей Вселенной: геометрия пространства-времени на самом деле не так проста, как на «равнине», и прямая дорога здесь выходит длиннее извилистой! Такие законы не имеют ничего общего со столь привычной нам евклидовой геометрией, а потому, чтобы разобраться в специальной теории относительности, пришлось разработать совершенно новый тип геометрии — лоренцеву геометрию.



Лоренцева геометрия и ее особенности

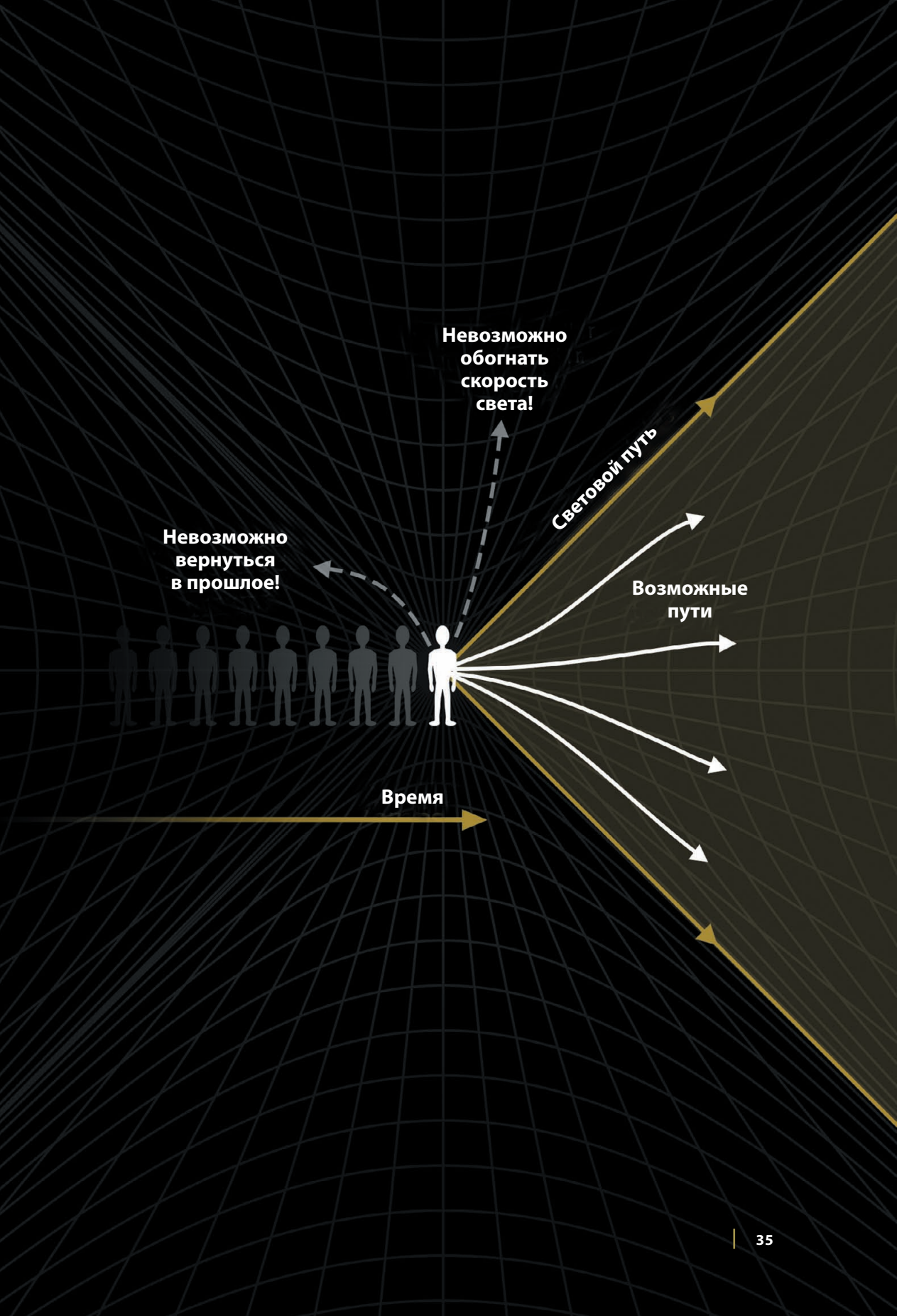
Хоть лоренцева геометрия и носит имя известного физика, в своем нынешнем виде она была формализована не самим Хендриком Лоренцем, а Германом Минковским, изобретателем концепции пространства-времени.

Минковский понял, что наша Вселенная не подчиняется законам евклидовой геометрии, а расстояния в пространстве-времени не удовлетворяют теореме Пифагора. Похоже, что они преобразуются согласно законам нового вида геометрии, так называемой метрики Минковского, в которой проводится фундаментальное различие между пространством и временем.

Лоренцева геометрия основана на довольно простом наблюдении: хотя время — это четвертое измерение, оно все же заметно отличается от трех других. Если вы встанете в достаточно большой комнате и сделаете три шага вперед, вы переместитесь в пространстве. Ничто не мешает вам развернуться и сделать три шага назад. Но попробуйте проделать то же самое во времени: пройдите вперед на три секунды в будущее, затем развернитесь и переместитесь на три секунды назад...

Если у вас получилось, законы физики пора пересмотреть! Но очевидно, что так не бывает и вернуться в прошлое невозможно. В этом и заключается принципиальная разница: в отличие от пространства, время не позволяет нам вернуться назад, мы вынуждены пересекать его из прошлого в будущее.

С помощью специальной теории относительности в 1905 году ученым наконец-то удалось сформулировать целостное представление о геометрии Вселенной с учетом постоянства скорости света. Значение СТО оказалось крайне влиятельным и революционным: нам пришлось отказаться от наивных рассуждений о понятиях пространства и времени и разработать совершенно новую геометрию, различающую эти два вида измерений. Но Эйнштейн не остановился на достигнутом... Опираясь на свое открытие, в последующие годы он попытался расширить сложившуюся парадигму и включить в нее еще одно фундаментальное явление Вселенной — свободное падение тел. Постепенно он выстроил новую, более общую теорию относительности.



Невозможно
вернуться
в прошлое!

Невозможно
обогнать
скорость
света!

Световой путь

Возможные
пути

Время

3 Гравитация по Ньютону

Почему яблоко падает с дерева? В своей специальной теории относительности Эйнштейн не учитывал явление, которое мы наблюдаем каждый день, — свободное падение тел. В последующие годы физик перевернул существующее представление о гравитации. Но, чтобы понять весь размах его революционной идеи, давайте начнем с модели Ньютона, которая показала себя крайне плодотворной с самого своего появления...



Галилей: все тела при падении движутся одинаково

На заре XVII века итальянский ученый Галилео Галилей заинтересовался тем, как падают тела. В то время считали, что чем объект тяжелее, тем быстрее он упадет в заданной среде: если подбросить в воздух два шарика, то первым упадет более тяжелый. Гипотеза казалась разумной, но Галилей увидел в ней парадокс.

Представьте, что вы сбрасываете камень с вершины башни. Массивный булыжник сразу же падает, врезаясь в основание здания. Но что, если разделить камень на две равные части и только затем сбросить? Поскольку каждый из этих двух кусков легче, они оба должны падать медленнее, чем весь камень целиком. Как отметил Галилей, что-то здесь не сходится... А теперь представьте, что вы соединяете два куска вместе и «собираете» камень. Поскольку он снова стал цельным, ему должна быть присуща прежняя скорость падения, но в какой именно момент следует считать, что два соединенных куска превратились в одно целое?

Чтобы решить эту проблему, ученый выдвинул гениальную гипотезу: по его мнению, камень обязательно должен падать с одинаковой скоростью, и неважно, расколот он или нет. Таким образом парадокса получилось избежать. Но Галилей пошел еще дальше и предположил, что все

тела, большие или маленькие, должны падать с одинаковой скоростью независимо от их состава. Он видел, что перо падает медленнее молотка, потому что его полет замедляют молекулы воздуха, из которого состоит атмосфера. Но ученый был убежден, что в отсутствие материи, способной их замедлить, перо и молоток падали бы одновременно! Иначе говоря, в вакууме свободное падение стало бы универсальным.

На тот момент его предположение было не более чем умозаключением. Исследователи еще не знали, как создать вакуум, и Галилей сделал все возможное, чтобы продемонстрировать свою идею с помощью хитроумных опытов. В 1971 году астронавты провели эксперимент, который представлял себе ученый: на Луне, где атмосфера отсутствует, перо и молоток упали одновременно. В наши дни этот принцип продолжают проверять и подтверждать с необычайной точностью.



Кеплер: планеты вращаются вокруг Солнца

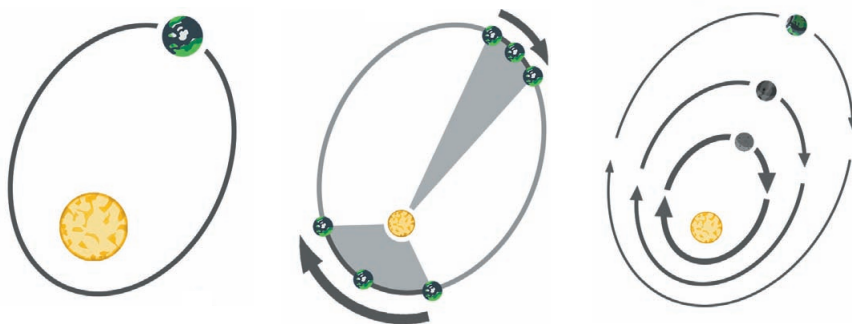
Немецкий астроном Иоганн Кеплер, современник Галилея, был последователем гелиоцентрической системы Коперника. Тогда господствующей точкой зрения был геоцентризм: считалось, что Земля находится в центре Вселенной, а Луна и Солнце вращаются вокруг нее. Но Кеплер в качестве центра рассматривал Солнце и решил доказать свою позицию. Кропотливо изучая астрономические труды своего учителя Тихо Браге, в период с 1609 по 1618 год астроном сумел сформулировать три закона — знаменитые «законы Кеплера», которые точно описывают движение звезд. Тем самым он представил мощный аргумент в пользу гелиоцентрической модели.

1. Закон эллипсов: планеты вращаются вокруг Солнца по эллиптическим траекториям, более или менее вытянутым*, в одном из фокусов которых находится Солнце.

2. Закон площадей: за один и тот же промежуток времени орбита планеты всегда пронесется над одной и той же по площади поверхностью. Из этого закона следует, что звезды ускоряются по мере приближения к Солнцу.

* На рисунках вытянутость эллипсов преувеличена. — Прим. науч. ред.

3. Гармонический закон: чем дальше планета от Солнца и чем длиннее ее орбита, тем медленнее она движется*. Марсианский год длится 687 земных дней, потому что Марс дальше от Солнца, чем Земля.



1. Закон эллипсов

2. Закон площадей

3. Гармонический закон

Тогда же в Италии Галилей совершил революционное открытие. Вооружившись астрономическим телескопом собственного изготовления, он впервые наблюдал четыре световые точки рядом с Юпитером. То были луны, вращающиеся вокруг планеты. Так Галилей обнаружил, что существуют и другие небесные тела, которые не обращаются ни вокруг Земли, ни вокруг Солнца. Наша планета не только не находится в центре Вселенной, но и числится лишь одним объектом системы среди уймы других: в космосе находится множество структур, которые состоят из вращающихся друг вокруг друга звезд.



К примирению двух явлений: гравитация

На заре XVII века Кеплер описывал движение планет, а Галилей изучал свободное падение тел. Но какая связь между этими двумя явлениями? Установить ее удалось только в 1687 году благодаря английскому математику Исааку Ньютону.

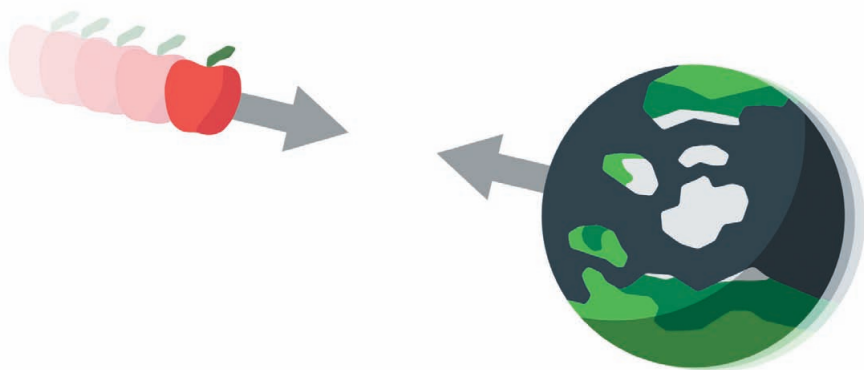
* Если точнее, формулировка третьего закона Кеплера звучит следующим образом: «Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей орбит планет». — *Прим. науч. ред.*

Легенда гласит, что Ньютон сидел под деревом на территории Кембриджского университета и ему на голову упало яблоко. Он задался вопросом: «Почему яблоко падает, а Луна — нет?» Несомненно, этот знаменитый эпизод романтизирован, а возможно, выдуман самим Ньютоном, но последовавшее за ним откровение оказало реальное и значительное влияние на дальнейшее развитие науки. В 1687 году Ньютон впервые представил модель, где объединились Земля и небо: теорию о всемирном тяготении.

Согласно Ньютону, все тела создают вокруг себя силовое поле — оно же гравитация или тяготение, которое тянет к себе другие тела. Если яблоко падает вниз, это значит, что Земля притягивает его к своему центру. А раз планеты вращаются вокруг Солнца, то выходит, что наша звезда приближает их к себе и не дает им удалиться. Спустя почти столетие после работ Кеплера модель Ньютона наконец-то позволила математически продемонстрировать три закона, сформулированные астрономом.

Но что же такое гравитация?

Гравитация — это сила, возникающая во всех телах, обладающих массой. Она ускоряет объект по отношению ко второму телу тем сильнее, чем оно массивнее. Яблоко падает на Землю, а не наоборот, поскольку планета гораздо массивнее фрукта: чтобы привести ее в видимое движение, нужен намного более массивный «напарник». Подвергаясь гравитационному притяжению, изначально статичное яблоко постепенно приходит в движение под действием силы, которая вызывает его падение со всё большей скоростью.



Понятие силы

В ньютоновской механике сила — это действие, которое меняет движение тела. Толкните неподвижный объект — и он наберет скорость. Поверните руль автомобиля — и он изменит направление движения. Поймайте теннисный мяч — и он остановится. Сила гравитации действует на тела точно так же: если бросить изначально статичный мяч, сила постепенно изменит его движение, ускоряя его и все быстрее приближая момент падения. Вот почему между прыжками с первого или третьего этажа есть ощутимая разница. Чем больше высота вашего падения, тем с большей скоростью вы ударитесь о землю!

На Земле та же сила, известная как тяжесть, удерживает нас на поверхности. Если бы вы могли прогуляться по Луне — масса спутника меньше, чем у Земли, — притяжение оказалось бы слабее и вы смогли бы прыгнуть в шесть раз выше! Астронавты так уже не раз развлекались. Если взвеситься на Луне, то весы, откалиброванные в соответствии с гравитационным притяжением Земли, покажут число, в шесть раз меньшее. При этом ваша масса не изменилась бы: да, на Луне весы показывают другое значение, но только потому, что вы меньше к ней притягиваетесь.

Вернемся к вопросу Ньютона: как получилось, что Луна так и не упала на Землю? Как можно использовать феномен гравитации для описания ее движения? Чтобы разобраться, Ньютон представил себе пушечное ядро, приводимое в движение с нарастающей силой.

Снаряд выпускается горизонтально, но гравитация в каждый момент времени тянет его вниз, так что его траектория искривляется, пока он не упадет. Математик понимал, что чем быстрее летит ядро, тем дальше оно приземлится, а при достижении определенной скорости оно будет идеально следовать кривизне планеты, не касаясь Земли. В таком случае после запуска ядро останется на «орбите» в вечном состоянии падения вокруг планеты. Вот почему звезды вращаются друг



вокруг друга, и именно так мы отправляем спутники на земную орбиту или посылаем зонды на другие планеты!

Ньютон осознал, что притяжение тела не бесконечно и уменьшается тем сильнее, чем больше от него удаляешься. Подобно лучу от свечи, который слабеет на расстоянии, гравитация теряет интенсивность по мере распространения на всё большие сферы. На расстоянии в два раза большем Земля притягивает вас в четыре раза слабее! Отсюда вытекает второй закон Кеплера: когда планета вращается вокруг Солнца, она должна двигаться быстрее по мере приближения к звезде, потому что ей приходится компенсировать более сильное влияние гравитации.

Закон Ньютона ознаменовал революцию в истории науки. Впервые уравнение было применимо как на Земле, так и в космосе. Однако универсальная природа свободного падения вызвала ряд вопросов... Как же так вышло, что все тела падают с одинаковой скоростью? Ньютон скорректировал свои вычисления с учетом новых размышлений, но ему не был известен источник этого явления. Ответов пришлось ждать до начала XX века.



4 Самая удачная мысль Эйнштейна

С помощью теории о всемирном тяготении Ньютон создал модель, где объединились два явления, которые раньше считались обособленными: свободное падение тел и движение планет. Но, несмотря на ее революционность, теория Ньютона обладала серьезными ограничениями...



Пределы теории о тяготении: слон и муравей

Слон и муравей мирно дремлют на скользкой поверхности замерзшего озера. Им угрожает опасность: лед может проломиться в любой момент и погрузить животных в холодную воду. Другого выхода нет: чтобы спасти их, придется вытолкнуть их на сушу и увести в безопасное место. Начнем с муравья: простой толчок — и насекомое скользит по льду на большой скорости. Вскоре муравей достигает берега. Теперь попробуем столкнуть слона... В этом случае придется приложить немало усилий. Толстокожее животное крайне массивно, и без использования большей силы с места его не сдвинуть!



Перед нами ключевое представление об инерции: чтобы привести массивные тела в движение, их нужно толкнуть сильнее, чем более легкие. Все физические силы подчиняются этому принципу. Но, как ни удивительно, он не применяется к силе тяготения...

Как мы уже видели, свободное падение универсально: все тела падают с одинаковым ускорением, независимо от их массы. Если бросить слона и муравья в вакууме, оба животных упадут в одно и то же время. Но здесь возникает проблема: если гравитация — это сила, то почему она отклоняется от принципа инерции? Почему слон не падает медленнее, чем муравей?

По мнению Ньютона, решение простое: всё, что нам нужно сделать, это скорректировать формулы таким образом, чтобы сила гравитации была пропорциональна массе тела, к которому она применяется. Следовательно, слон, который в миллион раз тяжелее муравья, будет испытывать силу притяжения в миллион раз большую, что объясняет, почему два животных падают с одинаковой скоростью. В некотором смысле Земля притягивает слона сильнее, чем муравья, и они падают вместе.

Но вас здесь ничего не шокирует? Откуда Земле «знать», что слон тяжелее муравья и одного нужно притягивать сильнее, чем другого? Согласитесь, в этом есть что-то странное.



Парк аттракционов и ощущение невесомости

Неподалеку от вас недавно открылся парк развлечений. Сгорая от любопытства, вы решаете навестить туда с друзьями и опробовать новые аттракционы. Один из них называется «Башня ужаса»: он представляет собой вертикальный пилон высотой 100 метров, на который сиденья поднимают, а затем внезапно начинается свободное падение, длящееся несколько секунд. Немного поколебавшись, вы всё же занимаете свое место на аттракционе. Веселье начинается. Сиденья медленно поднимаются по рельсам, а на самой вершине вдруг срываются, после чего несутся вниз все быстрее и быстрее. Что вы чувствуете?

Когда сиденье падает, ваш вес как будто мигмом исчезает. В течение этих нескольких секунд свободного падения вас больше ничто не держит

и вы чувствуете легкость. Вы словно парите над сиденьем, пока оно падает вместе с вами, — вы невесомы! Но как только оно замедляется и начинает тормозить, ваш вес возвращается: огромная сила внезапно прижимает вас к сиденью, как при резком ускорении автомобиля.

Может быть, вы уже катались на таком аттракционе. Ощущения поразительные! Наши органы поднимаются, парят в теле и неожиданно падают обратно, когда движение прекращается. Эйнштейну не довелось посетить такой парк, но именно похожий мысленный эксперимент натолкнул его на одну из самых плодотворных идей в истории физики.



Самая удачная мысль Эйнштейна: сила тяготения — это иллюзия

Опубликовав в 1905 году статью, в которой были изложены основы специальной теории относительности, Эйнштейн попытался описать гравитационную силу с опорой на новое видение мира. В один прекрасный день 1907 года, когда физик размышлял над этим, его посетило откровение. Он понял, что человек в свободном падении (как на нашей «Башне ужаса») не чувствует своего веса. Его органы как бы плавают в теле, и если во время падения он уронит какой-нибудь предмет, то этот объект останется неподвижным — гравитация пропадает из системы отсчета. Мысль может показаться незначительной, но для Эйнштейна это был «самый счастливый момент в жизни».

На самом деле упомянутый эксперимент позволяет нам переосмыслить всё от А до Я. В свободном падении на короткий миг вы перестаете ощущать свой вес. Вы находитесь в состоянии покоя, другими словами, на вас не действует никакая сила. И наоборот, когда вы стоите или сидите в кресле, Земля действует на ваши ноги с силой, которая вас отталкивает и не дает пройти насквозь. Эйнштейн считал, что нужна смена парадигмы: не наше тело падает вниз, а Земля ускоряется вверх! По его словам, «сила» тяготения — это иллюзия.

Такой подход может выглядеть совершенно надуманным, но, если поразмыслить, мы все знакомы с фиктивными силами, которые проявляются в результате иллюзорного восприятия. Представьте, что вы пассажир автомобиля и он трогается с места. Когда вы выглядываете из окна,

деревья, дома и все вокруг приходит в движение: по отношению к вам только машина остается неподвижной, а все остальное уносится назад. Разумеется, вы знаете, что ускоряется именно машина, но человек, всю жизнь проживший в автомобиле, не сможет себе этого представить. С его точки зрения, за окном все движется именно потому, что существует универсальная сила, которая тянет все тела назад!

В случае с тяготением мы тоже становимся жертвами иллюзии: кажется, что тела падают вниз по той же причине, что и проносящиеся мимо деревья во время поездки на машине.



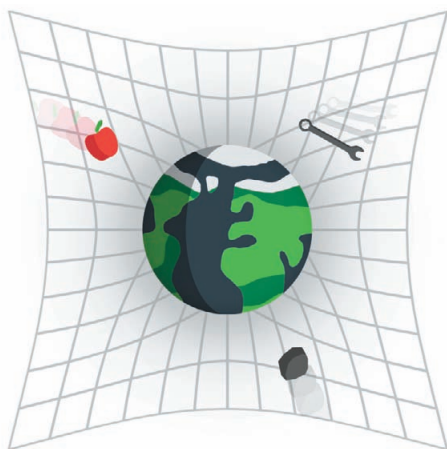
Эйнштейн предлагает нам сменить точку зрения и представить, что на самом деле Земля, на которой мы стоим, устремляется вверх! Казалось бы, идея абсурдная, но в ней содержится удовлетворительное объяснение универсальности свободного падения: все тела падают с одинаковой скоростью просто потому, что Земля поднимается им навстречу! Как и пассажир в машине, мы живем в ускоряющейся системе (на Земле) и поэтому воспринимаем некую таинственную силу (тяготение), хотя на самом деле нас выталкивает наверх! Силу тяготения нельзя считать физической, это иллюзия, фиктивная сила, которая проявляется только в нашей системе отсчета!

Не верите?

Попробуйте сами: загрузите приложение с акселерометром на свой смартфон и измерьте ускорение, пока он лежит на полу или на столе. Если телефон правильно откалиброван, вы увидите, что показатель не равняется нулю — устройство постоянно ускоряется вверх! Теперь перебросьте телефон из одной руки в другую. Во время короткого падения он находится в состоянии покоя и на него больше не влияет ускорение Земли: в этот момент акселерометр ничего не покажет.

САМАЯ УДАЧНАЯ МЫСЛЬ ЭЙНШТЕЙНА

Возникает вопрос: если на самом деле Земля повсюду ускоряется вверх, то почему не деформируется вся планета? Ведь если бы ее поверхность постоянно поднималась, будь то во Франции, Австралии или на полюсах, Земля должна была бы расти и раздуваться бесконечно, но она выглядит неизменной...



Ответ на этот парадокс лег в основу общей теории относительности. Вкратце: раз Земля не расширяется, то это происходит потому, что ткань Вселенной, в которую она погружена (пространство-время), скручивается, деформируется и изгибается под действием планеты, увлекая за собой все тела. Подобно рыбе, пытающейся плыть против течения, Земля должна постоянно ускоряться, чтобы компенсировать

свое падение и оставаться неподвижной. Такое ускорение обусловлено давлением материалов, из которых она состоит: если бы этого давления было недостаточно, наша планета обрушилась бы сама на себя, влекомая кривизной космоса!

Именно это и происходит при образовании звезды, когда в облаке межзвездного газа случается сжатие. Погруженное в ткань Вселенной облако разрушается, а его ядро нагревается и образует звезду. Каждый день рождаются миллионы новых звезд! Когда звезда исчерпывает все топливо, она теряет давление и разрушается под собственным весом. Ткань Вселенной динамична — она влечет за собой тела и звезды.

5 Общая теория относительности

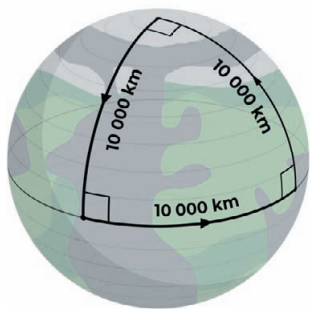
Эйнштейн понял, что тяготение Ньютона было всего лишь иллюзией: на самом деле Земля ускоряется вверх, создавая впечатление, что все тела падают одновременно. Через десять лет ему удалось выстроить теорию, которая наконец-то удовлетворительно объяснила феномен падения тел и представила новое описание мира. Модель оказалась даже более впечатляющей, чем его специальная теория, и называлась «общая теория относительности».



Загадка про орнитолога: введение в геометрию криволинейных поверхностей

Начнем с загадки. Орнитолог увидел, как на крышу его дома приземлилась очень редкая птица. Ему представился неожиданный шанс, поэтому он тут же попытался забраться наверх и поймать птицу, но она в панике улетела в восточном направлении. Наш орнитолог так просто не отступит — он готов ко всему и сделает все возможное, чтобы догнать птицу. Следуя за ней почти 10 000 км, он наконец видит, как птица приземляется. Охотник пользуется моментом и бросается вперед, но животное оказывается быстрее и снова улетает. Теперь птица меняет курс, поворачивает на 90° и направляется на север. Наш орнитолог, полный решимости поймать ее, собирается с силами и вновь пускается в погоню. Пройдя 10 000 км на север, он наконец находит птицу, но ее уже не застать врасплох: она поняла, что орнитолог следует за ней, и тут же повернула на юг. Его упорство начинает ослабевать. Измученный ученый дает себе обещание, что попытается хотя бы еще раз, и отправляется на юг. Каково же его удивление, когда в конце очередного захода на 10 000 км птица предстает прямо перед ним сидящей на

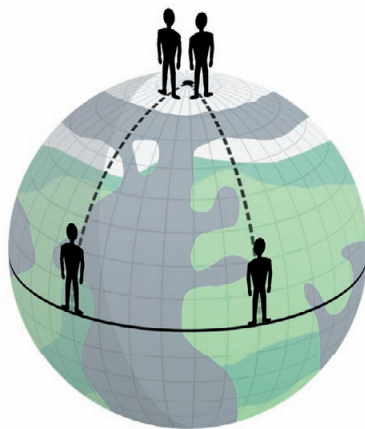
крыше его собственного дома! Орнитолог следовал за ней на восток, потом на север, потом на юг, и вот они вернулись домой. Как такое возможно?



Вероятно, вы уже знаете ответ. Земля не плоская — это сфера*, а орнитолог и птица прошли три четверти ее окружности, каждый раз преодолевая по 10 000 км. Они построили треугольник, три вершины которого образуют прямые углы. В школе вы учили, что сумма углов треугольника всегда равна 180° , однако при рассмотрении сферы дело обстоит иначе. Геометрия криволинейных поверхностей может открыться с удивительных сторон...

В предыдущей главе мы отметили, что математика позволяет описывать новые типы геометрии — например, уже упомянутую лоренцеву. XIX век был крайне плодотворным периодом в математике, особенно в вопросе изучения неевклидовых геометрий. Гаусс и Риман разработали мощные инструменты для описания криволинейных поверхностей, и с тех пор сферы, гиперболоиды и другие экзотические формы не таят для математиков никаких секретов.

Если два человека отправятся на север от экватора на поверхности сферы, то есть Земли, в конце концов они встретятся. Изначально их траектории параллельны и направлены на север, и, если бы Земля была плоской, они бы никогда не сошлись. Но, поскольку она искривлена, прямые линии в итоге пересекаются. Подумайте, насколько любопытно разворачивается такая ситуация: путешественники отправляются в одном направлении, идут прямо, и все же их траектории сближаются и в итоге пересекаются. С точки зрения обоих путешественников, некая таинственная сила будто бы притягивает их друг к другу.



* Точнее, сфероид, так как наша планета слегка сплюснута с полюсов. — Прим. науч. ред.



Гравитация по Эйнштейну: искривление пространства-времени

Центральная мысль общей теории относительности заключается в следующем предположении: что, если тяготение, то есть тот факт, что тела как бы притягиваются друг к другу, остается частью иллюзии, прямо как в случае двух путешественников? Что, если кажущееся существование такой силы объясняется своеобразной кривизной самой ткани Вселенной, в которой движутся объекты?

Как ни удивительно, но догадка, высказанная Эйнштейном в 1915 году, сейчас считается самым точным способом описания притяжения!

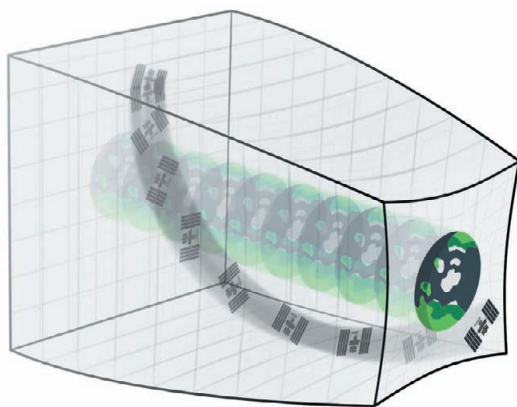
Давайте вернемся к парадигме, выдвинутой за несколько лет до этого в рамках специальной теории относительности. В ней Вселенная выглядит как огромный четырехмерный блок, неосязаемое переплетение пространства и времени (пространство-время). В этом континууме событий каждый объект прочерчивает свою линию сквозь Вселенную, постоянно двигаясь из прошлого в будущее. Когда тело находится в состоянии покоя и на него не действуют никакие силы, его линия движется прямо вперед через пространство-время. Поскольку нет никаких сил, отклоняющих ее от курса, нет и причин для изменения ее направления или дальнейшего разветвления.

Гениальную идею, которая подтолкнула Эйнштейна к созданию его теории, можно сформулировать следующим образом: учитывая, что падающий наблюдатель не ощущает своего веса и так называемая «сила тяготения» не проявляется в невесомости, можно сделать вывод, что падающие объекты находятся в состоянии покоя. Другими словами, поскольку на падающие объекты не действует никакая сила, они движутся прямолинейно в пространстве-времени. Их мировые линии — это прямые. В качестве примера можно взглянуть на астронавтов на Международной космической станции: они находятся в состоянии постоянного падения вокруг Земли в невесомости, ничто не может отклонить их от прежней траектории, и им приходится следовать прямым линиям в пространстве-времени...

Но почему же тогда кажется, что астронавты вращаются вокруг Земли? Наверное, вы уже догадались: пространство-время — это криволинейная поверхность! Точнее — четырехмерный криволинейный блок. Как

и в случае с двумя путешественниками на Земле, объекты притягиваются друг к другу не потому, что на них действует некая сила, а потому, что они движутся прямолинейно по искривленной сетке.

Орбита astronauts и космической станции как бы обернута вокруг Земли, поскольку геометрические параметры, согласно которым они движутся, искажены и изогнуты массой нашей планеты. Их траектория идеально прямая, но проходит она в геометрии криволинейных поверхностей.



Относительно легко представить себе искривленную поверхность в двух измерениях (например, поверхность сферы), но вообразить такой блок пространства-времени в четырех измерениях — совсем другое дело! К счастью, математика позволяет нам выйти за пределы наших суждений.



Уравнение Эйнштейна: геометрия = содержимое

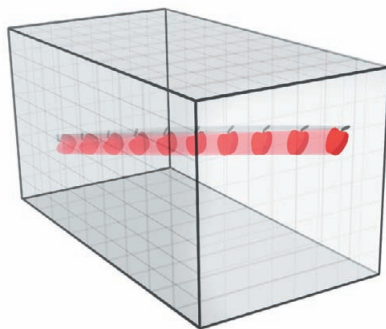
В период с 1907 по 1915 год Эйнштейн понял, что тяготение — это не сила, а простое проявление основополагающей геометрии, то есть кривизны пространства-времени. Описав Вселенную как податливый блок, сетку, структура которой подвергается деформации, физик сумел сформулировать новую математическую модель — общую теорию

относительности. Она была чрезвычайно продуктивной и более точной, чем модель Ньютона.

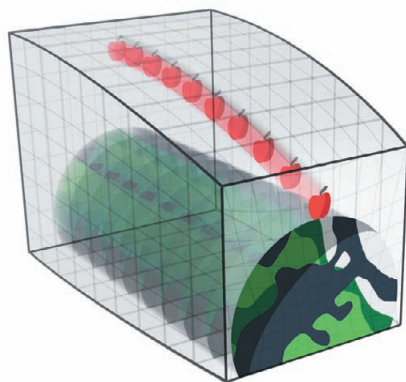
Однако мы до сих пор не выяснили, как эта кривизна появляется, где, когда и как деформируется пространство-время? В один прекрасный день, в ноябре 1915 года, Эйнштейн наконец ответил на этот вопрос, впервые представив фундаментальное и, возможно, самое важное уравнение в его карьере, позже названное уравнением Эйнштейна.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

Что оно обозначает? По сути, Эйнштейн отталкивался от предположения, что геометрия пространства-времени, его форма и кривизна могут быть напрямую связаны с тем, что оно содержит: объектами и звездами, которые в нем движутся. Его уравнение — это знак равенства между кривизной пространства-времени (слева) и содержимым Вселенной (справа). Проще говоря, кривизна = содержимое.



В отсутствие содержимого в пустой зоне Вселенной вдали от какой-либо материи или энергии кривизна равна нулю. Пространство-время в таком случае «плоское», его геометрия прямая и правильная. Это пространство-время, описываемое специальной теорией относительности: если забросить в него какой-нибудь предмет, например, яблоко или спутник, он полетит прямо, ни разу не отклонившись от своей траектории.



Теорию Ньютона все же нельзя назвать неправильной

Если теория Ньютона была вытеснена общей теорией относительности, почему ее до сих пор преподают? Причина проста: хоть она и не была абсолютно точной, теория Ньютона все равно представляет собой отличную аппроксимацию*. Она позволяет производить расчеты более простым способом, чем теория Эйнштейна, и поэтому во многих ситуациях оказывается гораздо практичнее. К примеру, она подходит для баллистических расчетов, изучения движения звезд или даже для отправки зондов в космос!** Общая теория относительности представляется полезной только тогда, когда нас интересуют экстремальные явления во Вселенной или когда мы пытаемся достичь чрезвычайно точных показателей: например, при синхронизации часов на спутниках GPS. Без теории относительности спутниковые системы геолокации, которыми мы пользуемся каждый день, попросту не работали бы!

Но в той области Вселенной, где есть массивное небесное тело, наподобие Земли или Солнца, пространство заполнено, в нем есть «содержимое». Согласно уравнению Эйнштейна, оно должно быть искривленным. Кривизна и содержимое неразделимы, ведь массивные звезды искажают пространство-время вокруг себя. Если бросить в эту зону предмет, он будет двигаться прямо, но по искривленному пространству. Его траектория будет казаться искаженной, изогнутой в сторону массивной звезды. Именно так яблоко падает на Землю, а спутник движется по орбите вокруг планеты.

Смену парадигмы от Ньютона к Эйнштейну можно описать следующим образом. В своей теории о всемирном тяготении Ньютон представлял, что звезды воздействуют друг на друга и, по его мнению, Земля оказывает воздействие непосредственно на яблоко. Но для Эйнштейна такой взгляд был довольно приблизительным, и на самом деле связь этих тел следует считать косвенной: сначала Земля деформирует и искривляет

* Аппроксимация, или приближение, — научный метод, который состоит в замене одних объектов другими, близкими к исходным, но более простыми. — *Прим. ред.*

** Поправки общей теории относительности (ОТО) используются в том числе и при расчетах орбит искусственных спутников — там это ощутимо. Для изучения движения звезд их иногда тоже используют. — *Прим. науч. ред.*

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

пространство-время, а затем меняется траектория яблока. Объекты действительно притягиваются друг к другу, но только не напрямую, потому что все они взаимодействуют с одним и тем же посредником — пространством-временем.

Новый подход позволил выдвинуть предположения, ранее неприменимые к модели Ньютона, а описание модели оказалось совместимо со специальной теорией относительности, из-за чего последняя стала более... общей. В настоящее время общая теория относительности остается наиболее полным представлением о Вселенной в крупном масштабе.

Как визуализировать общую теорию относительности?

Теория Эйнштейна уже тщательно проверена, но ее удивительные выводы порой трудно себе представить. Чтобы показать их более понятным образом, популяризаторы науки разработали несколько иллюстративных примеров.

1. Эластичная ткань

Такая визуализация встречается чаще всего. Вселенная представлена в виде большого полотна, на которое помещена массивная звезда. Под ее весом полотно проседает, а оказавшиеся рядом объекты закатываются внутрь, как шар в лузу.



Очень простое и интуитивно понятное изображение.

Демонстрирует, что тела притягиваются друг к другу опосредованно, через гибкое и деформирующееся пространство-время.



Создается впечатление, что звезды «накладываются» на Вселенную, хотя на самом деле они находятся внутри нее.

Феномен тяготения объясняется при помощи... тяготения! Получается, что тела закатываются в углубление именно потому, что они падают вниз?

2. Пространственная сетка

Во второй модели пространство представлено сеткой, изогнутой в трех измерениях. Если объект пройдет слишком близко к звезде, он отклонится и будет двигаться прямо по искривленной сетке.



Показывает космос таким, какой он есть на самом деле: перед нами трехмерный блок, охватывающий звезды.

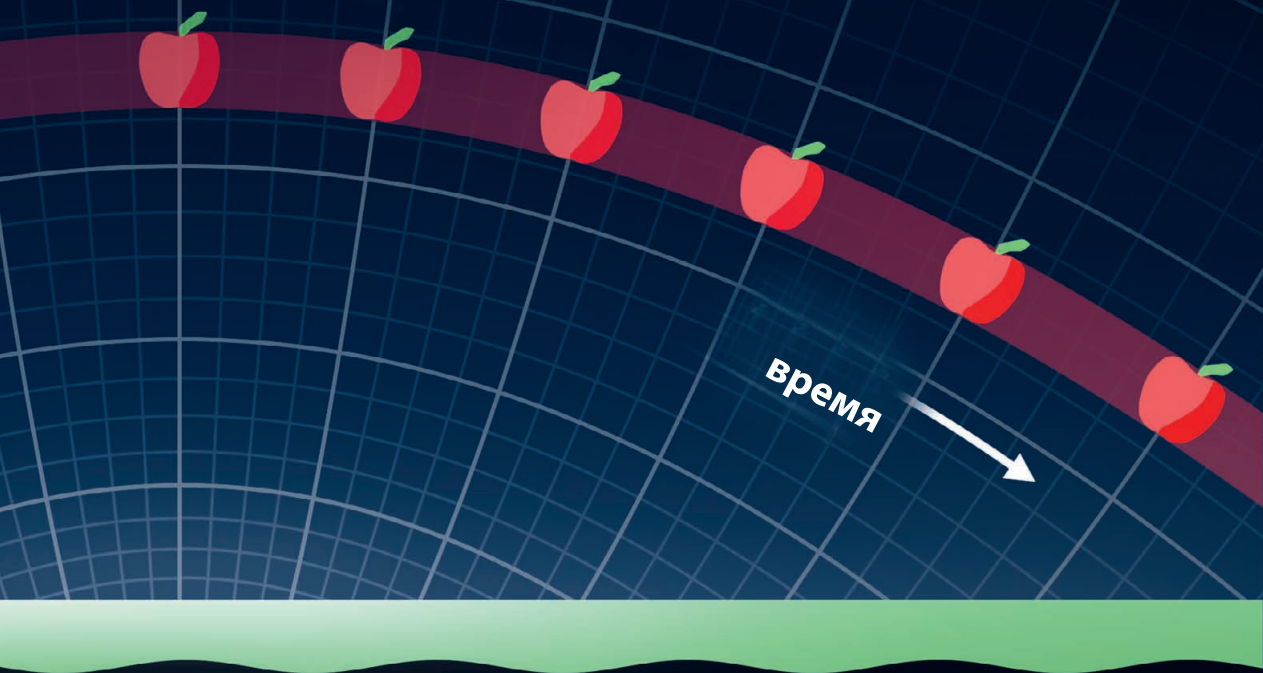


Не объясняет, почему неподвижное тело начинает падать или почему спутники способны оставаться на орбите.

Несмотря на простоту и наглядность, первые две иллюстрации не учитывают четвертое измерение Вселенной — время. В следующих двух предпринята попытка исправить это упущение.

3. Пространственно-временная сетка

На мой взгляд, эта визуализация — одна из лучших. Высота и время представлены на двумерной диаграмме, а Земля и яблоко движутся к своему будущему по временной шкале. Но масса планеты склоняет сетку к ее центру: время устремлено вниз! Следуя прямой траектории, яблоко постепенно поворачивается и начинает падать.



Видно, что тела не бывают неподвижными: они всегда устремлены в будущее.

Можно представить, что ускоряется сама Земля: пока яблоко движется по сетке, поверхность планеты сопротивляется собственному падению!



Модель менее интуитивна, поскольку требует понимания времени в качестве нового геометрического измерения.

Здесь пришлось удалить одно пространственное измерение, чтобы представить время.

4. Сетка в свободном падении

Последняя визуализация — моя любимая. В ней создается анимированное изображение, которое со временем меняется! Картинки следуют одна за другой, и сетка прогибается в сторону Земли, а яблоко уносит получившимся движением. Спутник, вращающийся вокруг Земли, постоянно притягивается к планете такой же сжимающейся сеткой.

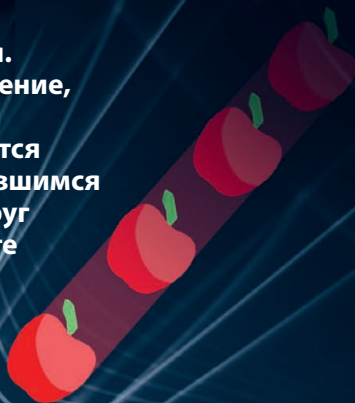


Иллюстрация одновременно понятна и согласуется с теорией. Благодаря анимации в ней появляется временной аспект и пространство-время демонстрируется во всех измерениях.



Создается впечатление, что пространство сжимается, хотя это не так. Сжатие сетки представляет собой течение времени, которое уносит объекты вниз.

Требуется видеонаоситель: сложно сделать простое статичное изображение, как показано здесь.

6 Гравитационные ВОЛНЫ

В общей теории относительности пространство-время уже не представляется фиксированной сеткой, нечувствительной к своему содержанию. Ткань Вселенной в ней — это такой же физический и динамический объект, который искривляется и преобразуется с течением времени. Как волны расходятся по поверхности воды, так и кривизна Вселенной распространяется вокруг и деформирует все на своем пути.



Скорость гравитации

Специальная теория относительности учит нас, что существует предел скорости, который никакой сигнал не способен превысить, — скорость света. Если бы вы захотели связаться с астронавтом на Луне, из-за такого ограничения вам пришлось бы мириться с минимальной задержкой в 2,6 секунды между сообщениями. Этот принцип также создает серьезные проблемы для писателей-фантастов, которым часто приходится прибегать к вольностям в попытках его обойти: хотя во многих фильмах люди мгновенно общаются сквозь космос, в реальности это абсолютно невозможно.



Но что насчет гравитации? Луна подвергается притяжению Земли, даже не касаясь ее. Можно задаться вопросом, считать ли их взаимодействие на расстоянии мгновенным. По крайней мере, именно так думал Ньютон. Английский математик предполагал, что если бы Земля сдвинулась с места, то Луна сразу бы ощутила эту перемену. Но нет, в теории относительности ответ ясен: никакая информация не в силах

Скорость гравитации

Как ни странно, скорость света имеет мало общего с самим светом. Название величины, выбранное по историческим причинам, искажает ее суть. Некоторые предпочитают альтернативные варианты вроде «скорости причинного воздействия» или «предельной скорости». Хотя свет действительно движется с такой скоростью в вакууме, перед нами лишь один пример среди множества других; то же самое относится к скорости гравитации, электрическим и магнитным силам, а также объектам, не имеющим массы. Скорость света — это константа, заложенная в самой структуре Вселенной.

распространяться быстрее скорости света, поэтому гравитация не может оказывать моментальное воздействие.

Согласно теории Эйнштейна, искривление пространства-времени распространяется постепенно, от одной точки к другой. Можно представить огромную эластичную ткань, которая деформируется подобно поверхности озера, когда в него бросают камень: кривизна разносится поступательно и образует волны. Если вызвать колебания массивного объекта, он создаст волны деформации, которые разойдутся по Вселенной, растягивая и сжимая всё на своем пути. Это и есть гравитационные волны. Их резвость покажется вам знакомой: как и свет, они движутся со скоростью 300 000 км/с! Если бы мы подвинули Землю, Луна продолжала бы следовать своей траектории чуть больше секунды, потому что кривизне пространства-времени потребовалось бы время, чтобы «обновить» информацию о положении планеты по отношению к ее спутнику.



Революция в астрономии

Уравнение Эйнштейна указывает на то, что любое массивное тело потенциально способно генерировать гравитационные волны. Если вы станете размахивать руками вперед-назад, то начнете создавать такие же волны (по крайней мере, в теории). Ваши руки состоят из материи и искажают пространство-время, а значит, размахивая ими, вы влияете на его

кривизну, которая распространяется вокруг вас. Однако в реальности такие волны окажутся бесконечно слабыми, и их будет невозможно обнаружить. Их след будет не мощнее свечения лампочки, увиденного из другой галактики.

Но бывают ли более интенсивные гравитационные волны, которые все же поддаются наблюдению? Хотя Эйнштейн учитывал их в своих уравнениях еще в 1916 году, поначалу он не был уверен в их существовании. Физик позже изменил свое мнение, но до самой смерти сомневался в том, что их когда-либо удастся обнаружить.

Однако 14 сентября 2015 года, через сто лет после того, как мир узнал об общей теории относительности, у международной коллаборации LIGO-Virgo впервые получилось зафиксировать сигнал гравитационной волны! Тот момент ознаменовал ошеломляющий успех теории и обозначил поворотный момент в истории астрономии.

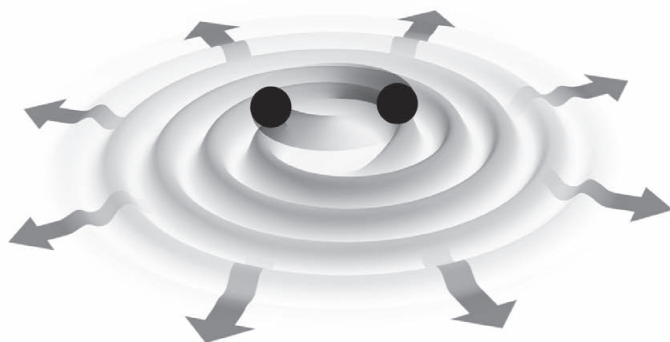
Так что же произошло?

Эта история началась давным-давно, за двенадцать миллиардов лет до нашей эры. В очень далекой галактике два межзвездных облака стали сжиматься и разрушаться под собственным весом. По мере роста давления частицы газа начали беспорядочно перемещаться, а температура взлетела до небес. Она стала настолько высокой, что в движение пришли механизмы ядерного синтеза: ядра водорода сливались, образуя более тяжелые ядра гелия. В процессе они выделяли безумное количество энергии в противовес сжатию облака. Так родились две звезды-гиганта, в несколько десятков раз массивнее нашего Солнца.

В течение тысячелетий обе звезды постепенно сжигали свой водород. Через несколько сотен тысяч лет у них закончилось топливо, и ядерный синтез в их центре прекратился. Звезды стали нестабильными: их внешние слои расширились, затем снова сократились и взорвались в виде сверхновой. Их ядра коллапсировали, образуя чрезвычайно плотные шары размерами всего в несколько километров, а искривление пространства-времени стало настолько сильным, что ничто не могло вырваться наружу, даже свет. Как следствие, каждая из двух звезд превратилась в черную дыру, масса которой в несколько десятков раз превышает массу Солнца. В следующих главах мы увидим, что именно представляют собой такие черные дыры.

С момента катаклизма прошло несколько миллиардов лет, а на расстоянии тысяч миллиардов километров сформировалась Солнечная система

и появились первые формы жизни на Земле. Но вскоре развернулись необыкновенные события... По мере опасного сближения черные дыры стали быстрее, вращаясь друг вокруг друга со скоростью, близкой к скорости света. Спиралевидное движение вело их к неизбежному столкновению. В этом бешеном танце пространство-время начало вибрировать все сильнее, и крайне мощные гравитационные волны устремились в бесконечность. Но вдруг, подобно двум мыльным пузырям, две черные дыры слились воедино. Они испустили последний всплеск гравитационных волн — настолько сильных, что в течение нескольких миллисекунд излучаемая энергия была намного интенсивнее, чем весь свет звезд в наблюдаемой Вселенной.



За какие-то миллисекунды черные дыры высвободили энергию, эквивалентную трехкратной массе Солнца, которая вырвалась наружу в виде гравитационных волн. Они распространялись более миллиарда лет, искажая все вокруг. Прodelав долгий путь, 14 сентября 2015 года эти гравитационные волны наконец достигли Земли и вызвали вибрацию планеты. Вас ими тоже слегка растянуло! Исследователи зафиксировали содрогание пространства-времени, и по измеренному сигналу им впервые удалось расшифровать историю тех двух черных дыр, слившихся более миллиарда лет назад.

К моменту выявления на Земле гравитационные волны, которые изначально были очень мощными, сохранили лишь малую толику своей прежней силы. В процессе их изучения датчики на оборудовании ученых

колебались всего на одну тысячную диаметра протона! Легко понять, почему Эйнштейн сомневался, что мы когда-либо сможем обнаружить такие волны: с тем же успехом можно попытаться различить толщину человеческого волоса на расстоянии нескольких световых лет. Поразительный технический подвиг обеспечил команде исследователей Нобелевскую премию по физике.

До сих пор астрономы исследовали Вселенную только с помощью одного типа волн — света и другого электромагнитного излучения (инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского и прочих). Но с открытием гравитационных волн перед учеными открылась еще одна область астрономии. Гравитация стала новым источником информации, из которого мы можем узнать больше о Вселенной. 17 августа 2017 года (в мой девятнадцатый день рождения) был обнаружен исторический сигнал: слияние двух нейтронных звезд одновременно испустило вспышку света и всплеск гравитационных волн. Ученые впервые одновременно наблюдали гравитационные и электромагнитные волны от космического события!

Как можно обнаружить гравитационные волны?

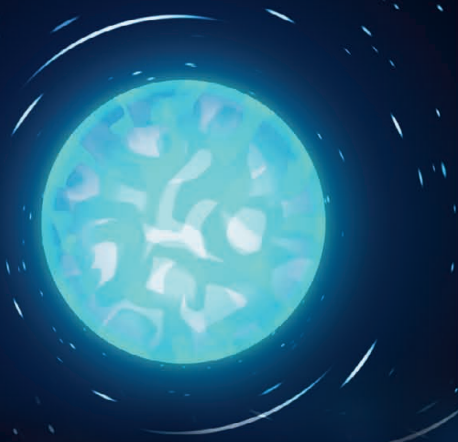
Гравитационные волны искажают и растягивают пространство между объектами, когда проходят рядом с ними. Именно на этом принципе основана работа специальных детекторов: с помощью системы лазеров происходит непрерывное измерение расстояния в двух перпендикулярных трубках длиной в несколько километров. Когда гравитационная волна проходит сквозь Землю, расстояния в трубках колеблются на несколько миллиардных долей нанометра, что физикам и удалось зафиксировать.

Другие следствия общей теории относительности

Отклонение света

На свет также влияет кривизна пространства-времени: когда он приближается к звезде, его лучи отклоняются. Из-за этого явления происходит смещение, увеличение и умножение изображений звезд, находящихся на заднем плане. Феномен стал известен как «гравитационное линзирование».

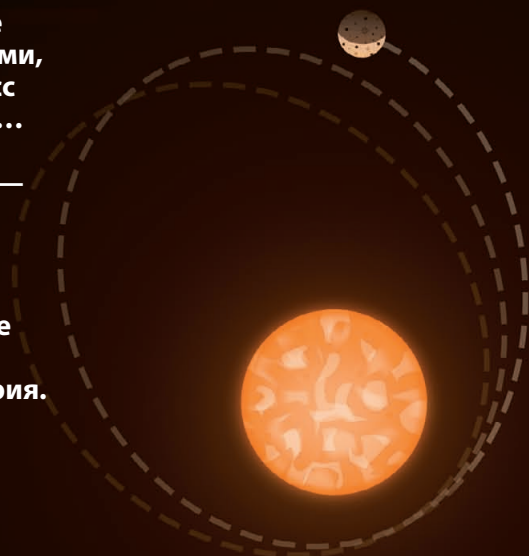
При наблюдении этого эффекта в 1919 году ОТО впервые была подтверждена.



Прецессия орбит

В Солнечной системе эллиптические траектории, прочерченные планетами, понемногу поворачиваются. Процесс можно объяснить теорией Ньютона... вот только Меркурий, согласно ей, отклоняется совсем незначительно — меньше, чем в реальности.

Благодаря общей теории относительности Эйнштейн смог объяснить наблюдаемое отклонение и понял, что именно кривизна Вселенной влияет на орбиту Меркурия.



Десинхронизация

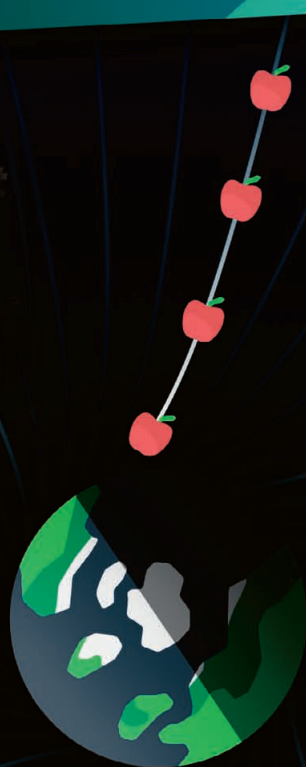
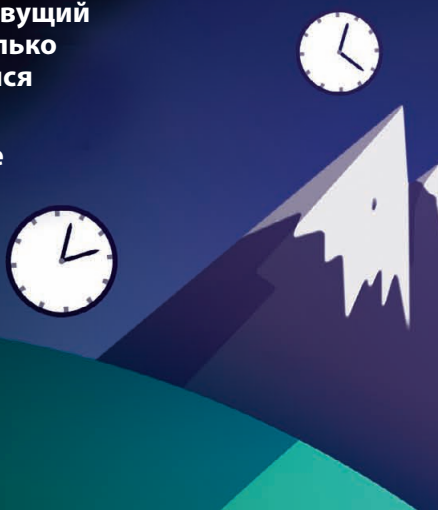
Вы могли наблюдать этот эффект в фильме «Интерстеллар»: два комплекта часов постепенно рассинхронизируются на разных высотах. Так, сам того не осознавая, живущий у моря человек стареет за год на несколько микросекунд меньше, чем поселившийся в горах.

Учет этого явления необходим в работе спутников GPS, чьи часы нужно синхронизировать с очень высокой точностью.

Эффект затягивания

Пространственно-временная сетка часто «цепляется» за движущиеся по ней объекты. Если вы стоите на месте, а рядом с вами разгоняется ракета, то ее движение слегка затягивает пространство-время — и вас вместе с ним.

Точно так же, когда звезда вращается сама по себе, она увлекает за собой ткань пространства-времени, а падающее яблоко немного отклоняется к востоку под влиянием вращения Земли.



7 История Вселенной

На заре XX века физики воспринимали Вселенную как огромный аквариум, вечный и незыблемый сосуд. Все изменилось с появлением теории Эйнштейна, когда стало понятно, что пространство-время искривляется, растягивается и вибрирует под воздействием гравитационных волн. Иначе говоря, оно постоянно меняется. Но всегда ли Вселенная была такой? Этот вопрос ознаменовал рождение современной космологии.



Космологическая постоянная и движение галактик

Переместимся в 1917-й, в разгар Первой мировой войны. Прошло два года после представления ученому сообществу общей теории относительности. Эйнштейн искал решения своего уравнения и пытался понять, что оно означает в масштабах Вселенной. Одна проблема особенно его беспокоила: уравнение будто бы указывало на то, что наш мир не статичен, что со временем он изменяется, а пространство становится все более сжатым...

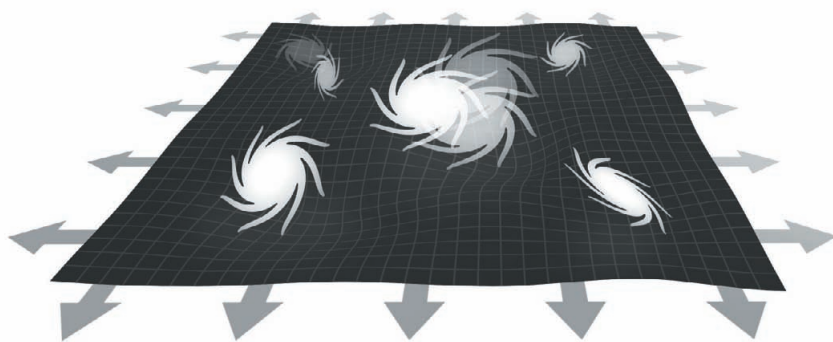
Как и его современники, Эйнштейн был убежден в неизменности Вселенной и поначалу решил, что перед ним возникла математическая проблема. Физик предпочел довериться интуиции, а не собственной теории, и изменил уравнение, добавив постоянную — крошечное число, влияние которого проявляется только в масштабах галактик. Таким образом Эйнштейн устранил сжатие космоса и получил статичную Вселенную, как он и хотел. Эта константа стала известна как «космологическая постоянная»: она выступает в качестве отталкивающей силы, которая не дает Вселенной коллапсировать. На тот момент Эйнштейн был доволен получившейся моделью, но позже он посчитал ее «самой серьезной ошибкой в карьере».

Расширение Вселенной не растягивает вас самих

Можно подумать, что расширение Вселенной слегка растягивает всё, что в ней находится, включая такие объекты материи, как мы с вами. К счастью, это не так, потому что атомы, из которых мы состоим, крепко связаны между собой и сопротивляются происходящему расширению. Аналогичный эффект можно наблюдать, если связать два шарика с помощью нитки и расположить их на ткани. После соединения два шарика больше не раздвигаются, даже если растягивается ткань под ними: они скользят по поверхности и остаются на одинаковом расстоянии друг от друга.

И действительно, несколько лет спустя наблюдения нескольких астрономов, в частности, Весто Слайфера и Эдвина Хаббла, показали, что наша Вселенная не статична, а находится в постоянном развитии.

Исследователи поняли, что цвет галактики говорит нам о ее перемещении: галактики стремятся к синему цвету по мере сближения и к красному по мере удаления. Это явление похоже на эффект Доплера: его мы наблюдаем, когда мимо проезжает машина скорой помощи и звук сирены меняется по мере ее продвижения. Изучая цвета далеких галактик, астрономы сделали неожиданное открытие...



Как ни удивительно, все далекие галактики — красные. Похоже, что все они неумолимо удаляются от Земли — другими словами, Вселенная расширяется. По мере дальнейших исследований ученые поняли, что на

самом деле галактики не движутся, но растягивается сама ткань Вселенной и увлекает за собой звезды. Прежде чем дойти до нас, свет от галактик удлинняется и смещается к красному под действием расширения космоса, что и объясняет результаты наблюдений. Космос похож на огромное упругое полотно, на котором лежат шарики: когда оно растягивается, все шарики удаляются друг от друга. Это и есть расширение Вселенной.



Модель Большого взрыва

Вы наблюдаете, как буханка свежего хлеба медленно выпекается в печи. Из-за дрожжей хлеб постепенно разбухает. Какой вывод вы можете сделать? Логически вы понимаете, что изначально кусок теста был меньше. Даже не застав его в прежнем состоянии, вы можете справедливо предположить, что до вашего прихода хлеб наверняка был более компактным. Вы только что совершили мысленное путешествие в прошлое...

Физики применяют те же самые рассуждения применительно ко Вселенной: поскольку наша Вселенная расширяется, в прошлом она должна была составлять более компактное целое. Это означает, что несколько миллиардов лет назад галактики располагались ближе друг к другу, а сама Вселенная была плотнее и горячее. Используя уравнения общей теории относительности, ученые шаг за шагом прокладывают обратный путь через всю историю Вселенной.

Пленка перематывается на самое начало, Вселенная сужается, а галактики становятся все ближе и ближе друг к другу. Но 13,8 миллиарда лет назад наступил переломный момент... В то доисторическое время космос был чрезвычайно сжатым: его содержимое образовывало субстанцию, температура которой могла достигать нескольких септиллионов* градусов по Цельсию! Этот «бульон» был настолько плотным и непрозрачным, что свет оказался полностью замкнут в его пределах. Затем, за доли секунды, первозданная Вселенная претерпела ослепительное расширение, и в мгновение ока расстояния увеличились в сотни септиллионов раз.

* В научной литературе говорят о 10^{32} К, например, в начальные моменты перед Большим взрывом. — *Прим. науч. ред.*

**Ошибочные
представления
о Большом взрыве**

Вопреки распространенному мнению, Большой взрыв не был первоначальным моментом возникновения Вселенной. Мы до сих пор не знаем, существовал ли такой «первоначальный момент» вообще. И вне зависимости от того, что можно услышать, Большой взрыв — это не вспышка, возникшая из центральной точки. Сам термин просто обозначает внезапную фазу расширения нашей Вселенной в прошлом, то есть период, в течение которого все расстояния значительно увеличились. Возможно, там что-то существовало и раньше, но на данный момент никто не знает наверняка. Нам придется подождать, пока квантовая космологическая модель даст ответы на эти вопросы.

Наконец, подобно ниспадающему движению мяча, процесс расширения постепенно замедлился.

В течение XX века Александр Фридман, Жорж Леметр и другие космологи помогли создать модель, которая впоследствии стала общепринятой при описании этой истории — знаменитой теории Большого взрыва. В 1964 году два американских физика из исследовательского центра Bell Laboratories непреднамеренно обнаружили слабый всплеск излучения (так называемое реликтовое излучение), исходящий из глубин Вселенной. Научное сообщество быстро установило связь с Большим взрывом: Арно Аллан Пензиас и Роберт Вудро Уилсон впервые наблюдали космологический микроволновый фон — изначальные проблески света из нашей Вселенной, испускаемые всего через 380 000 лет после начала ее расширения! Необычное открытие подтвердило теорию Большого взрыва и принесло двум исследователям Нобелевскую премию по физике.

С 1998 года мы знаем, что Вселенная снова начала разрастаться во все более ускоренном темпе. Существует некая, пока неизвестная энергия, которая подталкивает ее к расширению, — так называемая темная энергия. Ее природа до сих пор остается загадкой, но эту невидимую силу можно смоделировать математически с помощью космологической постоянной, введенной, а затем упраздненной Эйнштейном в 1917 году. Это доказывает, что даже «самая серьезная ошибка» физика впоследствии принесла свои плоды.



0

 10^{-33} секунд

1 микросекунда

380 000 лет

Периоды обозначены в «космическом времени»,
отсчитываемом от первых мгновений Большого взрыва

Планковская эпоха

В первые мгновения существования Вселенной ее плотность была настолько велика, что наши модели к ней попросту неприменимы.

Образование протонов

Вселенная становится холоднее. Образуются первые протоны и нейтроны.

Темные века

До появления первых звезд космос был абсолютно темным*!

Инфляция

За долю секунды расстояния умножаются на миллиард миллиардов миллиардов! Кратчайшие флуктуации растягиваются и ложатся в основу крупных структур.

Первые атомы

Протоны, нейтроны и электроны соединяются, образуя самые первые атомы. Вселенная становится светопроницаемой, излучается космический микроволновый фон.

* На самом деле, было реликтовое излучение и еще некоторый свет. Но да, это некоторый промежуток, когда отсутствуют яркие источники света. — *Прим. науч. ред.*

200 млн лет 5 млрд лет 9 млрд лет 13.8 млрд лет

Формирование Солнечной системы

Формирование Млечного пути



Вы находитесь
здесь!

Первые звезды

Постепенно образуются облака газа, которые стремительно сжимаются и порождают первые звезды. Формируются галактики.

Будущее Вселенной

Согласно общей теории относительности, Вселенная и дальше будет расширяться и охлаждаться...

8

Черные дыры

В заключение первой части я хотел бы рассмотреть одно из самых поразительных следствий общей теории относительности — черные дыры. Скорее всего, вы уже сталкивались с ними в научно-фантастических фильмах (например, в «Интерстелларе», где они показаны лучше всего), но знаете ли вы, что на самом деле представляют собой эти космические монстры?

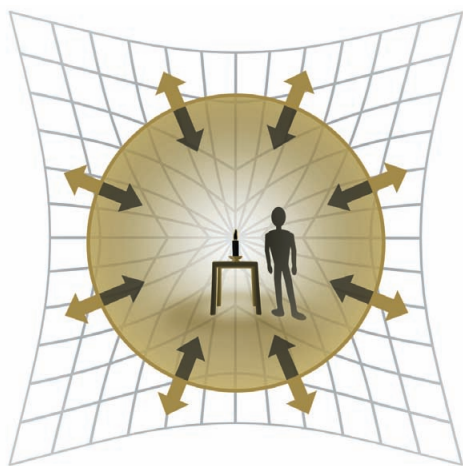


Пучки света и гравитации

Допустим, вы зажгли свечу в центре очень большой и совершенно темной комнаты. Свет от пламени распространяется во всех направлениях, окутывая вас и образуя своеобразный пузырь, который продолжает расширяться. Этот пузырь растет со скоростью света, и, оказавшись внутри него, уже невозможно выбраться за его пределы, потому что ничто не способно превысить скорость света. Образовавшийся пузырь определяет область, которую вы не сможете покинуть. К счастью, эта зона простирается до бесконечности, и если вы подождете достаточно долго, то сможете переместиться куда захотите.



Но теперь представим, что наша свеча располагается в искривленной области пространства-времени — например, рядом с планетой или звездой. Кривизна Вселенной порождает гравитацию, и тела притягиваются к центральной точке, словно на конвейерной ленте, несущей всё к центру. Но, поскольку гравитация тем сильнее, чем меньше расстояние до центра, она притягивает пространство-время быстрее света. Хотя ни один объект не может превысить эту скорость внутри пространства-времени, само по себе вблизи центра оно притягивается быстрее света и в этой зоне всё неумолимо тащится за ним. Даже свет уже не в состоянии выбраться, ведь он подвергается тому же тяготению!



В такой ситуации Вселенная окажется разделенной на две области, и вблизи центра ничто не сможет вырваться наружу, даже свет, потому что «движение» пространства-времени станет слишком быстрым. Но дальше от центра гравитация будет менее ощутимой, а у объектов получится

Черная дыра — это не звезда

Согласно распространенному заблуждению, черная дыра представляет собой массивное тело, похожее на звезду или планету. Но дело обстоит иначе: строго говоря, черная дыра — это просто нематериальная область, пузырь пространства-времени, в который ткань Вселенной «проваливается» быстрее света.

удалиться. Это и есть черная дыра — зона искривления пространства-времени, из которой ничто не может высвободиться. Граница черной дыры, где ткань Вселенной исчезает со скоростью света, называется «горизонтом событий». За этим горизонтом простирается черная дыра, откуда невозможно выбраться или отправить сообщение во внешний мир.



Как образуется черная дыра?

Разумеется, в природе черные дыры не формируются вокруг простой свечи. В целом такое искривление способна создать только крайне массивная и плотная звезда. Если бы вы захотели образовать черную дыру при помощи Земли, вам пришлось бы сжать нашу планету до объема менее обычного шарика!

Эти космические монстры появляются только во время катаклизмов в наиболее экстремальных регионах космоса.

Самые маленькие черные дыры образуются, когда умирает массивная звезда. У нее заканчивается топливо, она становится нестабильной и коллапсирует, а ее внешние слои приходят в движение в молниеносном взрыве. Так формируется сверхновая. Тем временем останки звезды продолжают разрушаться, и ее «труп» становится настолько сжатым, что притягивает пространство-время быстрее света. С этого момента ничто не может вырваться наружу — перед нами черная дыра.

Но в течение своей жизни такие зоны продолжают расти. Они захватывают материю и сливаются с другими черными дырами. Так образуются гигантские черные дыры

Черная дыра — это не космический пылесос

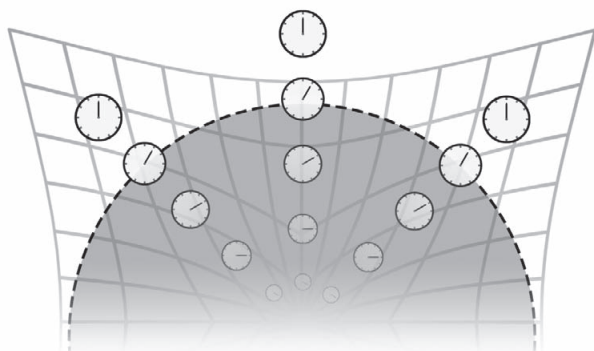
Кривизна пространства-времени, которую вызывает черная дыра, похожа на искривление вокруг планеты: если запустить спутник, он сможет вращаться вокруг черной дыры, даже не приближаясь к ней. Таким образом, черная дыра — это не космический пылесос, поглощающий все вокруг себя, а просто область Вселенной, которая создает поле притяжения так же, как и звезды.

в несколько миллионов раз массивнее нашего Солнца. По оценкам специалистов, в центре каждой галактики (включая нашу) находится сверхмассивная черная дыра.

О существовании черной дыры в центре нашей галактики начали подозревать еще в 1970-х годах: изучая движение звезд, астрономы вскоре поняли, что они вращаются вокруг невидимого объекта. Хотя черные дыры не излучают свет, они выдают свою позицию гравитационным воздействием. Их можно обнаружить по траектории движения захваченных звезд или облаков плазмы, а также при наблюдении за миражами, которые они создают из-за отклонения света далеких звезд. Другими словами, нам доступно множество улик, подтверждающих их существование.

Время в черной дыре

Хотя существование черных дыр было предсказано Карлом Шварцшильдом еще в 1915 году, когда он делал свои расчеты из окопов немецкого фронта в разгар Первой мировой, долгое время их рассматривали как математическую проблему, не имеющую отношения к реальности. По интересному совпадению, фамилия Шварцшильд в переводе с немецкого означает «черный щит» — вполне подходящее имя для физика, создавшего первую модель черной дыры! Сейчас мы знаем, что эти пузыри пространства-времени в самом деле существуют, но физикам было трудно признать наличие черных дыр именно потому, что такие объекты очень сложно поддаются объяснению.

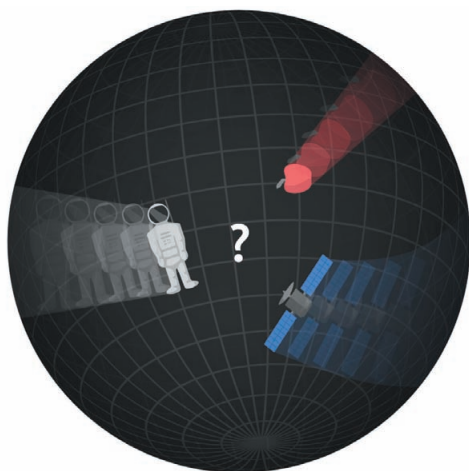


ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Помните, что в теории относительности время — это направление, в котором движутся все объекты? Далее по траектории находится ваше будущее, и вы не можете повернуть назад. Вернуться во времени по определению невозможно. Только подумайте: после пересечения горизонта черной дыры вам уже никак не возвратиться и не выбраться наружу, чтобы избежать ее притяжения! В черной дыре всё вынуждено двигаться к центру, иначе говоря, само время направлено к ее середине.

В некотором смысле все массивные небесные тела искривляют время в сторону своего центра: на Земле яблоко падает вниз, потому что его будущее склоняется к планете. Но в черной дыре кривизна пространства-времени настолько выражена, что время полностью устремляется вниз и сливается с тем, что мы бы назвали «высотой», — выбраться обратно невозможно, потому что это было бы равносильно путешествию в прошлое. Преодолев горизонт черной дыры, вы оставляете всю остальную Вселенную позади, в своем прошлом.

Обратите внимание, что центральную точку черной дыры на самом деле нельзя считать точкой — это скорее мгновение в будущем. Всем телам суждено упасть туда, потому что именно там находится их будущее. В этой позиции кривизна пространства-времени становится бесконечной, а ткань Вселенной «рвется», и никакие, даже экзотические гипотезы не дают нам ответа на вопрос о том, что же там происходит. Гравитационная сингулярность в центре черной дыры настолько слабо выражена, что в дело вступают явления квантовой физики, которые мы пока не можем описать.




Как выглядит черная дыра?

Черные дыры — это нематериальные зоны Вселенной, которые нельзя увидеть снаружи. Тем не менее они захватывают окружающую материю и отклоняют движение света, что приводит к интересным визуальным эффектам.

Свет отклоняется от черной дыры, и в результате сильно искажается изображение звезд. Кажется, что они раздваиваются и изгибаются вокруг горизонта.

В центре виден темный диск — «тень» черной дыры. Перед нами изображение горизонта, от которого до нас не доходит свет. Из-за того, что свет отклоняется, черная дыра кажется больше, чем есть на самом деле.

Рядом располагается первая «фотография» Стрельца А*, черной дыры в нашей галактике. На изображении в условных цветах, представленном 12 мая 2022 года, показана вращающаяся вокруг нее материя. Запечатлеть что-то подобное — настоящий технический подвиг, ведь распознать черную дыру на таком расстоянии не легче, чем рассмотреть волосок в Лионе, глядя из Парижа!



Материя, захваченная черной дырой, образует аккреционный диск вокруг нее. Вращаясь почти со скоростью света, плазма достигает температуры в миллиарды градусов и интенсивно сияет. Если бы нас не ослепляло ее свечение, мы бы увидели эту структуру в таком же голубом цвете, что и наиболее горячие звезды.

Из-за отклонения света изображение диска сильно искажено. Его задняя часть будто бы сворачивается выше и ниже горизонта, образуя светящееся кольцо.

Что происходит в черной дыре?

Отважившись на невероятное путешествие, вы прыгаете в сверхмассивную черную дыру. Высокопрочный скафандр позволит вам избежать смертоносной радиации и других космических неприятностей.

Через несколько минут вы наконец достигаете горизонта, но при погружении в самую черную дыру не отмечаете ничего особенного. Звезды остаются видимыми за горизонтом, поскольку их свет падает вместе с вами.

По мере падения ваша скорость начинает увеличиваться. Звездному свету все труднее догнать вас, и он бледнеет, переходя в красный спектр.

ГОРИЗОНТ

Ближе к центру пространство-время тянет ваши ноги быстрее, чем голову. Вас разрывает на части из-за разницы в гравитации. В мгновение ока черная дыра превратила вас в спагетти.

На данный момент никто не знает, что произойдет с вашими останками в центре черной дыры.

Но если бы кто-то наблюдал за вашим падением со стороны, восприятие событий с его точки зрения оказалось бы иным.



В процессе падения вашему свету становится труднее выбраться из черной дыры. Кажется, что ваш полет замедляется, а часы тикают всё медленнее и медленнее.



Ваше изображение словно теряет яркость: вы блекнете, ваш цвет становится все более тусклым и красным (увеличение длины волны), но никогда не исчезает полностью (черный цвет — это отсутствие света).



Если смотреть со стороны, вы никогда не пересечете горизонт — с этого момента вы так и останетесь частью тени черной дыры!



тень





КВАНТОВЫЙ МИР



Пока общая теория относительности описывает макромир, второй столп современной физики сосредоточен на изучении микромира, вселенной бесконечно малых величин.

Из чего состоят предметы? Как ведут себя частицы, их составляющие? На все эти вопросы теория Эйнштейна ответить не могла. В течение XX века исследователи разработали совершенно новую парадигму для описания бесконечно малого: квантовую физику.

В отличие от общей теории относительности, которая дает нам довольно четкое представление о Вселенной, квантовая физика сообщает крайне мало сведений о действительности. Перед нами «черный ящик», набор весьма продуктивных математических принципов, которые все же лишены каких-либо естественных интерпретаций. Почему ее абстрактные расчеты так хорошо описывают то, что мы видим? Как природа ведет себя на субатомном уровне «на самом деле»? До сих пор выдвигаются самые разные объяснения, но реального консенсуса ученые достигли далеко не по всем вопросам.

Моя цель во второй части книги — рассказать об основных принципах этой науки, рассмотреть новые явления, которые она описывает, а также изучить связанные с ней метафизические проблемы. Мы начнем с погружения в материю, чтобы открыть для себя целую энциклопедию частиц, населяющих наш мир, а затем рассмотрим их странное поведение и способы влияния друг на друга.

9 Стандартная модель

Из чего состоит материя? Какие силы действуют на нее на фундаментальном уровне? В XX веке физики открыли структуру веществ и поняли, что всё вокруг нас состоит всего из нескольких основных компонентов или же строительных блоков, которые упорядоченно сочетаются и взаимодействуют. Речь идет об элементарных частицах.



Всё более мелкие листы бумаги

Чтобы понять, из чего состоит мир, нам придется проникнуть в глубины материи до уровня атомов и за его пределы.

Возьмите стандартный лист бумаги формата A4 и разрежьте его пополам. Получится лист вдвое меньшего размера, известный как формат A5. Повторите эксперимент, и вы получите лист A6, затем A7 и так далее. Кусочки бумаги с каждым разрезом становятся все меньше, но получится ли продолжать так до бесконечности? Как будет выглядеть, скажем, лист формата A30, то есть разрезанный двадцать шесть раз?

На самом деле такой лист бумаги был бы настолько мал, что понадобился бы микроскоп, чтобы его разглядеть: он будет состоять из одного целлюлозного волокна размером не более нескольких десятков нанометров!

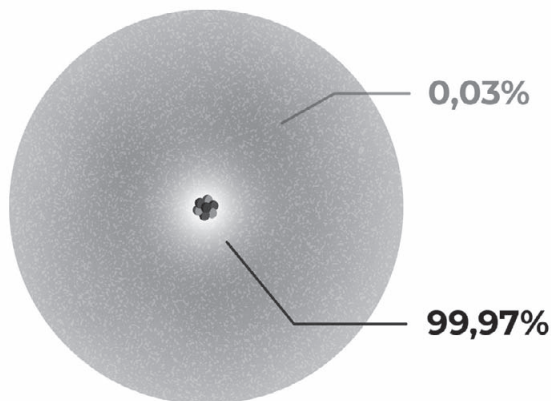
На данном этапе уже не приходится говорить о полноценном листе бумаги, но давайте продолжим и разрежем наш «лист» еще несколько раз.

Когда мы погружаемся в материю, наш лист распадается на тысячи мелких блоков. Это молекулы сахара, а именно — глюкозы. В масштабах нашего листа такие молекулы имеют длину не более нанометра, в сто раз меньше вируса. Столь малые объекты невозможно увидеть с помощью

обычного микроскопа: сами световые волны слишком велики, чтобы их выявить. К счастью, современные технологии выходят за рамки подобных ограничений и позволяют нам исследовать материю еще глубже.

Разбирая молекулы (в листе бумаги, человеческом теле или даже звезде), мы обнаружим, что все они состоят из атомов. В переводе с древнегреческого *atomos* означает «нерушимый», «неделимый»: философы представляли атомы как мельчайшие строительные блоки материи. Спустя две тысячи лет, в 1909 году, французский физик Жан Перрен окончательно подтвердил их существование в своих работах. Он продемонстрировал, что колебание мелких частиц на поверхности жидкости можно объяснить исходя из предположения, что сама жидкость состоит из атомов. Открытие принесло ему Нобелевскую премию.

Но вскоре исследователи обнаружили, что атомы — совсем не то, чем они кажутся, и их тоже можно разложить на более элементарные строительные блоки. Каждый атом содержит крошечное ядро, состоящее из протонов и нейтронов, вокруг которого вращается обширное облако электронов. Затерянное в центре облака ядро — крошечное, не больше мяча в масштабах футбольного поля, но на него приходится более 99,9% массы атома!



Наконец, увеличив масштаб протонов и нейтронов, мы обнаружим, что они сами состоят из «бульона» с другими частицами: кварками и глюонами. Мы только что достигли масштаба листа бумаги формата А60, и на этом наше исследование заканчивается. На данный момент

дальше продвинуться невозможно: электроны, кварки и глюоны представляются фундаментальными, элементарными и неделимыми.

В течение XX века физики постепенно выстроили самую мощную систему описания частиц из существующих на сегодняшний день — Стандартную модель, наш лучший портрет квантового мира. Согласно этой концепции, во Вселенной существуют следующие классы фундаментальных частиц: лептоны, кварки и бозоны, а также их античастицы. Стандартная модель группирует и классифицирует фундаментальные частицы в соответствии с их собственными характеристиками (электрический заряд, масса, спин). Из всего этого многообразия выделяются два больших семейства: фермионы, составные части материи, и бозоны, переносчики взаимодействия, — и бозон Хиггса.

Элементарные частицы

В физике термин «частица» имеет довольно общее значение. Им можно обозначить любой крошечный элемент, который служит составной частью более крупных структур: например, пылинку, молекулу или атом. Но частицы, представляющие для нас интерес далее, — это элементарные частицы, то есть те, которые нельзя разделить.



Фермионы, частицы материи

Частицы из семейства фермионов считаются основными составляющими материи. Они отличаются от других частиц тем, что подчиняются принципу исключения — физическому положению, согласно которому два тождественных фермиона (например, два электрона) ни в коем случае не могут сосуществовать в одном и том же состоянии. Если они идентичны, то попросту не могут одновременно находиться в одном месте! Свойство, характерное для фермионов, придает им устойчивую форму и позволяет материи сохранять твердость. Именно этот принцип не дает нам провалиться сквозь стул, когда мы на него

садимся: атомы в нашем теле и атомы в стуле не могут проникнуть друг в друга, потому что состоят в том числе из неразличимых электронов!

В Стандартной модели семейство фермионов включает в себя 12 типов частиц.

Верхние и нижние кварки. Это самые распространенные во Вселенной кварки. Обычно они объединяются в группы по три и составляют протоны и нейтроны в основе атомных ядер.

Странные и очарованные кварки. Более редкие и массивные, чем два предыдущих типа, и в них содержится больше энергии. Такие кварки очень нестабильны, что приводит к их быстрому распаду.

Прелестные и истинные кварки. Еще более редкие и тяжелые, чем предыдущие кварки. Например, истинный кварк исчезает всего через одну миллиардную долю миллиардной доли микросекунды!

Электроны, мюоны и тау. Вы наверняка знакомы с электронами, которые переносят электричество. Они вращаются вокруг атомов, компенсируют электрический заряд протонов и обеспечивают нейтральное состояние материи. В сущности, менее известные мюоны и тау — это большие электроны, более редкие и массивные.

Электронные, мюонные и тау-нейтрино. Пожалуй, последние три типа фермионов можно назвать самыми удивительными. Нейтрино — это очень легкие нейтральные частицы. Они крайне мало взаимодействуют с другими частицами: миллиарды нейтрино проходят через вас каждую секунду, но вы этого даже не замечаете!



Бозоны, переносчики взаимодействия

В отличие от фермионов, семейство бозонов включает в себя все частицы, которые не подчиняются принципу исключения. Когда встречаются два одинаковых бозона, ничто не мешает им пройти друг через друга или находиться в одном и том же состоянии. Как правило, эти загадочные частицы менее знакомы широкой публике. Их называют «переносчиками», транслирующими реакции между частицами материи.

Фотон. Безусловно, это самый известный тип бозонов. Фотоны составляют световой поток и осуществляют электромагнитное взаимодействие. Именно из-за них существует магнетизм и электрическая сила. Фотоны путешествуют по Вселенной со скоростью света и позволяют нам видеть далекие звезды и галактики.

Глюон. Второй бозон необходим для существования атомов. Удачно названный, глюон* действует как клей между кварками и обеспечивает целостность атомного ядра. Оказываемая им реакция похожа на натянутую резинку: она становится тем сильнее, чем дальше мы пытаемся разделить кварки. Процесс известен как «сильное взаимодействие» — это самая мощная сила в нашей Вселенной, но она действует только в масштабах атомного ядра.

Z- и W-бозоны. Оба бозона несут в себе еще одну силу — так называемое слабое взаимодействие. В отличие от фотонов и глюонов, они обладают массой. Их эфемерное существование позволяет нейтронам и протонам превращаться друг в друга, а радиоактивным частицам — распадаться. Без них мы не смогли бы использовать радиоуглеродный метод датирования в археологии при изучении древних реликвий.

Бозон Хиггса. Долгое время последний бозон оставался недостающим кусочком пазла. Хотя уравнения предсказывали его существование еще в 1960-х, экспериментально бозон Хиггса удалось обнаружить лишь в 2012 году. Он объясняет массу фермионов, а также Z- и W-бозонов. Открытие стало большим успехом для Стандартной модели, которую этот бозон наконец-то дополнил!

В ходе описания материи и типов взаимодействий (фермионы и бозоны) Стандартная модель объясняет все основные явления в физике элементарных частиц. Она учит нас, что квантовый мир подчиняется трем фундаментальным силам: электромагнетизму, а также сильному и слабому взаимодействиям. Математические формулы позволяют описывать все эти явления с беспрецедентной точностью, но перед нами неполная модель, которая не учитывает четвертый тип взаимодействия во Вселенной — гравитацию. Почему и как частицы искривляют пространство-время? Самая серьезная проблема современных фундаментальных исследований вытекает из попыток объяснить происхождение гравитации в масштабах частиц и согласовать общую теорию относительности со Стандартной моделью. Подробнее об этом мы поговорим позже...

* От англ. glue — клей. — Прим. ред.

фермионы, частицы материи

кварки

верхний
кварк



заряд $2/3$
спин $1/2$
масса $2,2 \text{ МэВ}/c^2$

очарованный
кварк



заряд $2/3$
спин $1/2$
масса $1,3 \text{ ГэВ}/c^2$

истинный
кварк



заряд $2/3$
спин $1/2$
масса $173 \text{ ГэВ}/c^2$

нижний
кварк



заряд $-1/3$
спин $1/2$
масса $4,7 \text{ МэВ}/c^2$

странный
кварк



заряд $-1/3$
спин $1/2$
масса $96 \text{ МэВ}/c^2$

прелестный
кварк



заряд $-1/3$
спин $1/2$
масса $4,2 \text{ ГэВ}/c^2$

электрон



заряд -1
спин $1/2$
масса $0,5 \text{ МэВ}/c^2$

мюон



заряд -1
спин $1/2$
масса $106 \text{ МэВ}/c^2$

тау



заряд -1
спин $1/2$
масса $1,8 \text{ ГэВ}/c^2$

электронное
нейтрино



заряд 0
спин $1/2$
масса $<1 \text{ эВ}/c^2$

мюонное
нейтрино



заряд 0
спин $1/2$
масса $<0,2 \text{ МэВ}/c^2$






тау-ней-
трино



заряд 0
спин $1/2$
масса $<18 \text{ МэВ}/c^2$

лептоны

бозоны — переносчики взаимодействия

глюон  заряд 0 спин 1 масса 0	бозон Хиггса  заряд 0 спин 0 масса 125 ГэВ/с ²
фотон  заряд 0 спин 1 масса 0	
Z-бозон  заряд 0 спин 1 масса 91 ГэВ/с ²	
W-бозон  заряд ±1 спин 1 масса 80 ГэВ/с ²	

Хиггс

10 Суперпозиции и вероятности

Похоже ли движение квантовых частиц на поведение обыкновенных шариков? Чтобы описать их образ действий, физикам XX века пришлось разработать совершенно новую структуру — квантовую физику, которая перевернула наше представление о мире. В этой главе мы познакомимся с принципами, лежащими в основе этой дисциплины, а также столкнемся с самыми поразительными явлениями в рамках данной книги. Такие феномены поднимают вопросы о самой природе объектов и смысле существования наших моделей.

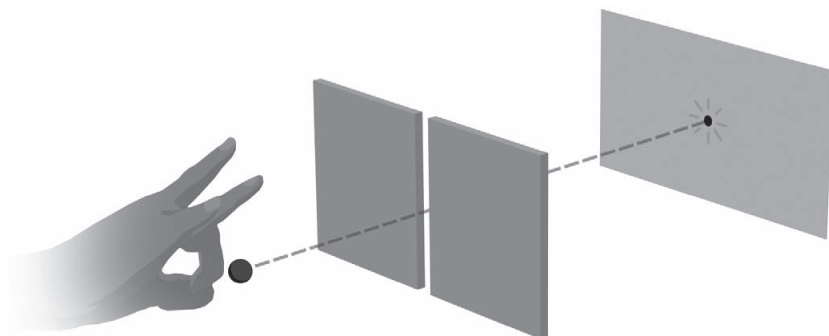


Частицы не похожи на шарики

В детстве вы наверняка играли с шариками: они катятся и сталкиваются друг с другом, а смысл игры заключается в траекториях их движения. Кажется очевидным, что определить местонахождение объектов по смене их положения с течением времени довольно просто. Даже в общей теории относительности движение тел описывается мировыми линиями, то есть траекториями в пространстве-времени. Но, к сожалению, в масштабах частиц все не так просто — нам снова придется отказаться от интуитивно понятных образов...

Представим себе стенку с прорезанной щелью, за которой находится перегородка. Одним движением руки вы направляете к ней шарик. Идеально запущенный снаряд проходит через щель, упирается в перегородку и оставляет след на месте удара. Теперь повторите эксперимент: возьмите второй шарик и запустите его тем же образом. Если ваше движение будет точно таким же, объект пролетит по прежней траектории и окажется в том же месте. Поскольку шарик располагается в одной точке и приходит в движение аналогичным путем, результат будет идентичным.

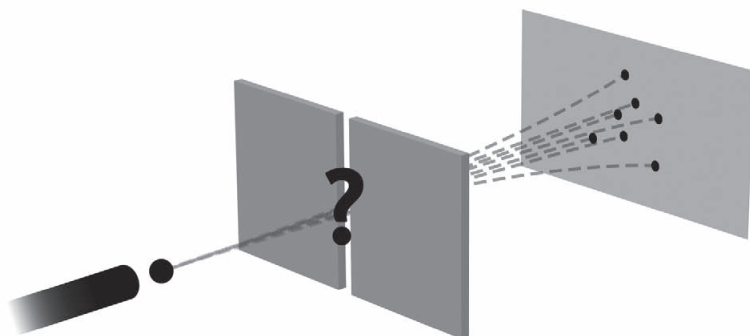
Классическая физика здесь детерминирована: воздействие шарика на перегородку предопределено способом его броска.



Но давайте сделаем то же самое в мире частиц...

Поместим перегородку, способную фиксировать частицы, за микроскопической стенкой с очень тонкой щелью. Предположим, что мы можем пропускать по одной частице за раз (что, собственно, и делают исследователи в лаборатории). Как вы думаете, что мы увидим на перегородке?

Как и следовало ожидать, когда вы запускаете частицу и она попадает на перегородку, ее след отпечатывается в одной точке за щелью. Пока ничего удивительного, но давайте запустим вторую частицу. И снова она касается стенки и отпечатывается в точке, однако на этот раз ее положение немного сместилось. Частица была запущена тем же способом, но попала на перегородку в другом месте. А если запустить третью частицу и затем четвертую, их положение на перегородке каждый раз будет немного отличаться.



Несмотря на то что все частицы подвергаются совершенно одинаковому воздействию, в итоге они принимают разное положение. Удары непредсказуемым образом формируют рассеянное облако точек за щелью. Как такое возможно?



Мир вероятностей

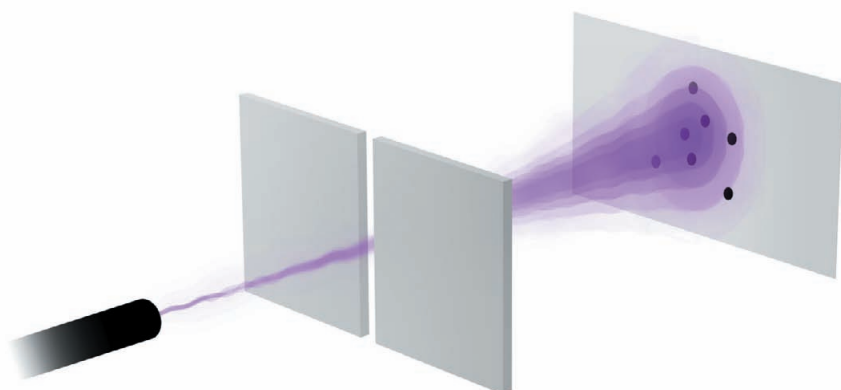
Как ни странно, законы квантового мира нельзя считать детерминированными. Невозможно предсказать места попадания частиц, когда они смещаются друг относительно друга. В отличие от привычного нам масштаба, здесь мы не можем заранее определить результат эксперимента. Но значит ли это, что нам придется отказаться от любых попыток описать подобные явления? Вовсе нет.

Чтобы характеризовать неизвестное поведение частиц, физики в начале XX века разработали квантовую механику. В отличие от классической, где определяется точное положение тел с учетом течения времени, в квантовой механике ученые стремятся установить лишь вероятность наблюдения заданного результата при измерении. Прежде чем частицы подвергнутся наблюдению, к ним применимо так называемое облако вероятностей — набор возможных точек их присутствия, распределенных в пространстве и указывающих, где они материализуются скорее всего. Когда Вселенная играет с нами в наперстки, сами законы физики обретают вероятностный характер.

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi\rangle = \hat{H} |\Psi\rangle$$

В 1925 году австрийский физик Эрвин Шрёдингер сформулировал так называемое уравнение Шрёдингера, где впервые описал, как меняются такие облака вероятностей. Точное положение частицы непредсказуемо, его нельзя установить заранее, но сами вероятности определить можно.

Волна присутствия частицы преобразуется как рябь на воде, и мы в состоянии описать ее движение сквозь Вселенную. Законы физики в этом случае описывают уже не движение тел, а применимые к ним вероятности.



Если задуматься, многие предметы в нашей повседневной жизни можно считать диффузными: облако газа рассеивается в воздухе, а капля чернил растекается в воде. В отличие от привычных нам тел, квантовые частицы поддаются точечному наблюдению: каждая из них образует локализованное воздействие на перегородку, и только их область потенциального присутствия распространяется в пространстве с течением времени. Квантовый мир — это вселенная возможностей, допустимых точек присутствия и волн вероятности. До того как мы их измерим, частицы поддаются описанию лишь как облако вариантов, из которых они могут наугад «выбирать» итоговый результат.

Атомы — не маленькие солнечные системы

Вопреки привычному представлению об электронах в атоме, это не маленькие шарики, вращающиеся вокруг ядра, как планеты — вокруг Солнца. Напротив, их присутствие распределено в облаке вероятностей, так называемой орбитали, рассеянно занимающей пространство вокруг ядра.



Основополагающий принцип: квантовая суперпозиция

Когда частица меняется, ее присутствие рассеивается, дробится на россыпь вариантов, среди которых в процессе наблюдения она «выбирает» нужный в случайном порядке. Чтобы описать происходящее действие, физики основали свои модели на одной фундаментальной идее — принципе квантовой суперпозиции. Мысль заключается в следующем.

Перед измерением частица находится в неопределенном состоянии, в котором ее свойства еще не «выбраны». Сразу сосуществует несколько вариантов, и частица пребывает в суперпозиции. Если в классической физике состояние объекта всегда определено (он имеет точное положение, скорость или энергию), квантовые объекты будто бы постоянно колеблются между несколькими альтернативами. Множество вариантов может сосуществовать вплоть до последнего момента в виде уложенных друг на друга слоев с большей или меньшей вероятностью реализации. Но когда производится измерение, частицы вынуждены «принять решение» и определиться с тем или иным свойством.

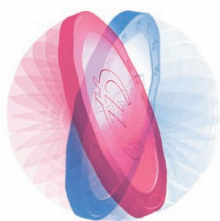
Важно осознать масштаб этого переворота по отношению к классической физике.



Представим, что я подбрасываю монету. Пока она кружится в воздухе, мне трудно заранее определить, какой стороной она упадет. В лучшем случае я могу сказать, что 50% вероятности есть как у орла, так и у решки. Конечно же, результат не будет случайным! Если бы я знал точные условия броска, то теоретически мог бы использовать законы физики для предсказания результата. Вероятности, которые я приписываю итоговой позиции, всего лишь выдают мой недостаток знаний.

Но теперь представим, что аналогичным образом я подбрасываю условную квантовую монетку. На этот раз она не ограничена состояниями «орел» или «решка»: прежде чем монета упадет обратно в мою руку, она может

оказаться в неопределенном состоянии суперпозиции, в котором оба результата смешаются. В таком случае монета не находится ни в одном из двух положений, и, даже если бы я идеально контролировал бросок, было бы совершенно невозможно предсказать, какой стороной она «решит» упасть мне в руку. В отличие от классической физики, квантовая физика кажется принципиально непредсказуемой. Вероятности больше не указывают на недостаток наших знаний: они присущи самому физическому процессу.



Разумеется, у квантовой монеты нет сознания, она не принимает никаких решений. Но, по всей видимости, существует некая форма фундаментальной произвольности, характерная для Вселенной: она позволяет существовать объектам, свойства которых определяются лишь тогда, когда они подвергаются наблюдению. Пример с квантовой монетой — простая аналогия, поскольку подобные явления проявляются только в масштабах частиц, но она помогает нам понять ту практическую роль, которую играют вероятности в квантовом мире.



Квантовая интерференция: когда присутствие двух элементов превращается в их отсутствие

Если вы раньше не сталкивались с этими понятиями, скорее всего, вам будет трудно в них поверить. В конце концов, откуда нам знать, что квантовые вероятности не стали таким же следствием нашего неведения? Действительно ли есть разница между тезисом, что частица находится в состоянии суперпозиции, и более скромным утверждением о том, что наши модели еще недостаточно точны? Следующий эксперимент должен убедить вас, что разница все же есть.

Как и раньше, запустим несколько квантовых частиц в стенку, за которой находится перегородка. Но на этот раз в стенке есть две тонкие щели, расположенные очень близко друг к другу. Как вы думаете, что произойдет? Можно предположить, что мы увидим два облака точек, по одному за каждой щелью: частица пройдет либо через левую, либо через правую щель, столкнувшись с перегородкой за соответствующим разъемом.

Однако мы наблюдаем нечто иное... Чтобы разобраться, давайте на мгновение вернемся к макроскопическим масштабам.

Вы когда-нибудь задумывались, как работают шумоподавляющие наушники? Эти устройства обладают удивительной способностью глушить окружающий шум и поддерживать тишину во время использования. Как такое возможно?

На самом деле звук — это волна, вибрация молекул газов, составляющих воздушную смесь, при их столкновении друг с другом. И когда звуковая волна достигает ваших ушей, теоретически всё, что нужно сделать, это вытолкнуть воздух в другом направлении и тем самым погасить вибрацию. Именно так и работают наушники: улавливая окружающий шум и генерируя совершенно противоположные звуковые волны, они сохраняют тишину во время воспроизведения звука.

Каким бы ни был тип волны, будь то звук, свет или рябь на воде, всегда можно погасить сигнал, наложив на него противоположную волну. Этот процесс известен как деструктивная интерференция. Когда две волны встречаются, они складываются вместе, но в случае полной противоположности они нейтрализуют друг друга.

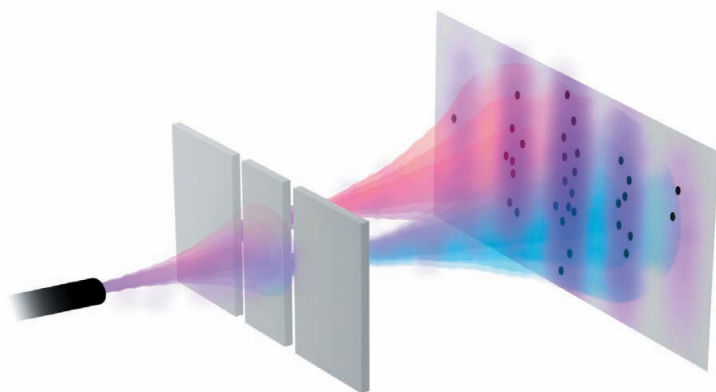


Теперь можно вернуться к нашему эксперименту.

В квантовом мире частицы — это конкретные объекты, которые проявляются в виде точек на перегородке. Но до того, как они подвергнутся наблюдению, их присутствие не локализовано: оно распределено по облаку вероятностей и расплывается как волна. Такие волны тоже могут быть подвержены интерференции. Облако присутствия частицы способно взаимодействовать с самим собой, и там, где сходятся две одинаковые

волны, присутствие частицы усиливается, а там, где встречаются две противоположные волны, облако нейтрализуется и частица исчезает.

Поэтому, когда частица устремляется к двум щелям, то разделяется надвое: она проходит через обе щели одновременно и накладывается на перегородку за стенкой. В некоторых местах вероятность ее появления увеличивается, но в других она полностью исчезает. У частицы больше нет возможности появиться на перегородке там, где нет ее облака вероятностей: запуская частицы одну за другой, мы увидим, как появляется узор из длинных последовательных полос.



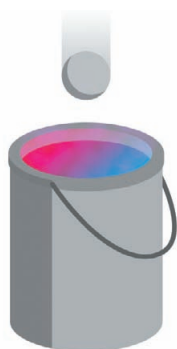
Этот эксперимент, мягко говоря, озадачивает. Он показывает нам, что частицы «знают» о существовании двух щелей, а вероятность их присутствия нельзя воспринимать как простую неопределенность. Они перемещаются словно некая неосоздаваемая нематериальная жидкость и все-таки затрагивают реальность. Когда в стенке есть две щели, частицы ведут себя по-разному, потому что облако их присутствия проходит через обе щели и оказывает воздействие, сравнимое с расходящейся волной. Открытие этого явления в начале XX века повергло научное сообщество в шок и породило множество вопросов. Какова роль таких облаков вероятностей? Стоит ли рассматривать их в качестве простых математических инструментов для прогнозирования дальнейших результатов или же это конкретные объекты с осязаемыми качествами? До сих пор существует множество соперничающих интерпретаций, и, хотя квантовая физика успешно описывает подобные явления, она очень мало говорит нам об их природе.



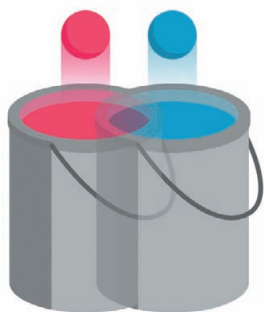
Квантовая запутанность: когда две частицы навсегда связываются

Всё это очень волнующе, но мы еще не закончили. До сих пор мы рассматривали только отдельные, изолированные частицы, но что будет, если встретятся несколько квантовых частиц? Может произойти удивительное явление: их квантовые суперпозиции станут навсегда связанными друг с другом. Это и есть квантовая запутанность.

Чтобы понять, что такое запутанность, давайте проведем мысленный эксперимент в привычном нам ракурсе. Не забывайте, что это всего лишь аналогия: подобные явления видны только в микроскопических масштабах.



Возьмите банку и наполните ее «квантовой краской». Представьте, что эта краска находится в состоянии суперпозиции: в ней 50% красного цвета и 50% синего. Если бы мы наблюдали за ней, краске пришлось бы выбрать один из двух цветов, но пока мы этого не делаем, она существует в суперпозиции — ее цвет еще не определен. Теперь возьмем белый шарик и окунем его в банку. Как вы думаете, какого цвета он будет — красного или синего? Сказать трудно, но ответ на этот вопрос поможет нам лучше понять квантовый мир.



Если подумать, то у шарика нет выбора: поскольку сосуществуют две возможности (в одной краска красная, в другой — синяя), то шарик тоже должен находиться в суперпозиции. Два сценария будто бы происходят параллельно — в той «реальности», где краска красная, шарик окрашен в красный цвет, а в другой — в синий.

Вся картина может показаться незначительной, но мы только что пронаблюдали важнейшее явление: если бы в этот момент мы следили за ситуацией, вынуждая оба объекта определиться с цветом, то шарик и краска всегда принимали

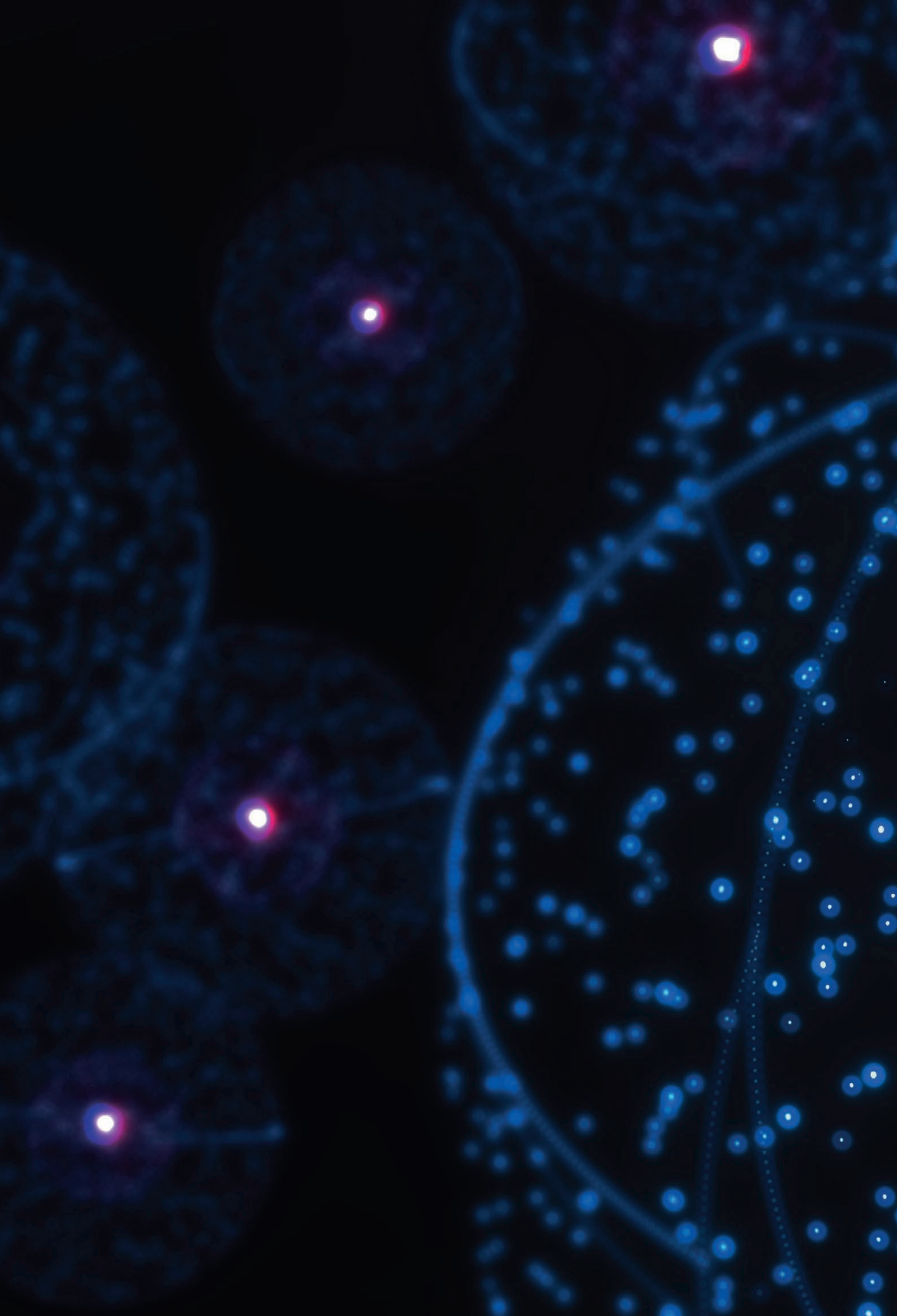
Запутанность не нарушает принципа относительности

Будьте осторожны: можно подумать, что квантовая запутанность позволяет обмениваться информацией мгновенно, нарушая принцип специальной теории относительности, который гласит, что невозможно передавать информацию быстрее скорости света. В действительности это не так. Помните, что результат квантового эксперимента непредсказуем, поэтому невозможно использовать квантовую запутанность, чтобы отправить кому-либо сообщение, ведь вы не можете заранее знать, что получит другой человек.

бы один и тот же вид. Они «решали» бы вместе, и оба были бы либо красными, либо синими, но всегда одного цвета! Встретившись, шарик и краска перестают существовать независимо: они соединились друг с другом навсегда. Даже если бы мы разделили их по разным краям космоса, они все равно остались бы взаимосвязанными. Шарик и краска теперь существуют в единой суперпозиции в рамках всей Вселенной.

В мире частиц такое встречается повсеместно. Как только две частицы сближаются, их состояния смешиваются и собираются в одном квантовом облаке. В процессе наблюдения за одной из двух частиц оба объекта также вынуждены прийти к единому «решению», и происходит это независимо от расстояния между ними.

Когда физики впервые обнаружили квантовую запутанность, многие не могли свыкнуться с мыслью, что она способна действовать на расстоянии мгновенно. Некоторые выдвинули предположение о существовании так называемых скрытых переменных — недоступных нам параметров, согласно которым две частицы как будто приходят к соглашению еще до своего разделения. Именно так считал Эйнштейн: он был убежден, что физика может действовать только локально. Но теперь мы знаем, что эта гипотеза не выдерживает критики. В 1980-х годах французский физик Ален Аспе провел гениальный эксперимент и сумел продемонстрировать, что скрытых переменных не существует. Две спутанные частицы «выбирают» свое состояние только в последний момент, даже если они находятся по разные стороны Вселенной. Работа Аспе обеспечила ему Нобелевскую премию по физике в 2022 году.



11 Проблема измерения

Теория относительности дала нам довольно понятное представление о Вселенной: пространство-время описано в ней как ткань, по которой движутся объекты. Однако квантовая физика не говорит нам, как интерпретировать ее расчеты. Почему процесс «измерения» вынуждает частицы выбирать состояние? Волны вероятности в самом деле существуют или перед нами лишь инструменты для анализа?

В этой главе, где физика граничит с философией, мы увидим, что существует несколько способов вообразить квантовый мир...



Декогеренция: квантовая физика в наших масштабах

Вы когда-нибудь видели яблоко, которое находилось в двух местах одновременно? Или монету, у которой выпадает и орел, и решка сразу? Конечно, нет. Странности квантовой физики отсутствуют в привычном нам масштабе. Даже на уровне клеток нашего тела физические законы сохраняют совершенно классический вид*, но следствия квантовой физики так и остаются незримыми. Почему так происходит? Почему между двумя мирами будто бы существует граница? Ответ кроется в феномене квантовой запутанности.

Представим себе на минуту, что макроскопический объект (скажем, автомобиль) может существовать в квантовом состоянии: он колеблется между положениями «в движении» и «статичный». В такой ситуации автомобиль не движется и не стоит на месте: он выбирает один из этих

* На самом деле мы уже знаем, что квантовые эффекты, такие как когерентность и туннелирование, обеспечивают эффективность процесса фотосинтеза, работу ферментов и мутации ДНК. — *Прим. науч. ред.*

вариантов только тогда, когда подвергается наблюдению. Само собой, перед нами не просто одиночная частица, ведь автомобиль состоит из миллиардов миллиардов частиц. Было бы наивно ожидать, что каждая из них будет выбирать свое состояние случайным образом независимо от других. Итак, в момент наблюдения автомобиль оказался бы «разделен» надвое: половина частиц решила бы оставаться статичной, а другая половина выбрала бы движение. В таком случае мы могли бы увидеть квантовую суперпозицию в нашем масштабе. Так почему же мы не можем этого сделать?



В действительности атомы и частицы, из которых состоит автомобиль, нельзя считать независимыми: они постоянно взаимодействуют друг с другом посредством тепла, вибрации, света и химических связей. Реагируя в такой мере, все частицы неизбежно спутываются. Их квантовые состояния переплетаются, связываются в единую суперпозицию, и, когда мы наблюдаем за автомобилем, все частицы принимают одно и то же состояние: автомобиль либо полностью статичен, либо полностью находится в движении.

Этот важнейший феномен известен как «квантовая декогеренция». Он объясняет, почему квантовые случайности не наблюдаются в наших масштабах. Когда взаимодействует большое количество частиц, их состояния мгновенно становятся спутанными. Квантовые суперпозиции не исчезают, но объединяются в единое наложение, из-за чего все частицы делают одинаковый «выбор» в момент измерения. Поэтому для изучения подобных объектов в лаборатории необходимо максимально изолировать их от внешнего мира в идеальном вакууме без света и материи. Также нужно охладить их, приблизив температуру как можно ближе

Декогеренция в процессе измерения

Представьте, что вы хотите определить положение футбольного мяча. Чтобы увидеть его, достаточно направить на него свет. Другими словами, все, что вам нужно сделать, — это облучить его фотонами. В таком масштабе мяч практически не подвержен стороннему воздействию, но в масштабе частиц сложившиеся условия не пройдут бесследно: они немедленно повлияют на частицу, которую вы хотите измерить. В квантовом мире любое наблюдение меняет то, что мы пытаемся изучить. С тем же успехом можно попробовать «увидеть» мяч, забросав его другими мячами. Частицы взаимодействуют с нашим измерительным оборудованием, и в дело быстро вступает декогеренция.

к абсолютному нулю ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), чтобы избежать любого теплообмена. Квантовая декогеренция объясняет, почему мы не видим объекты в суперпозиции в наших масштабах: простая пылинка, парящая в воздухе, претерпевает декогеренцию менее чем за миллиардную долю миллиардной доли секунды!

К сожалению, мы всё еще не увидели ответа на то, как суперпозиция сходится к одному варианту при наблюдении. Да, частицы объекта «соглашаются» в вопросе своей суперпозиции, но что вынуждает их окончательно определиться в процессе измерения? Перед нами не просто физический вопрос, а метафизическая проблема. Если мы довольствуемся тем, что принимаем квантовую механику как простую математическую модель, нам придется признать, что она прогнозирует вселенские явления с необычайной точностью. Модель работает чертовски хорошо, но мы так и не знаем, почему...



Проблема измерения

Квантовая декогеренция объясняет, почему суперпозиции не наблюдаются в наших масштабах, но у нас остаются и другие вопросы. Действительно ли суперпозиция исчезает после измерения? Правда ли

частицы сокращаются до единой точки в облаке? Что происходит с другими альтернативами? Если уравнение Шрёдингера отлично описывает квантовый мир вне процесса наблюдения, то почему его поведение так внезапно меняется в ходе измерения? К тому же наши измерительные приборы тоже состоят из частиц. В совокупности эти вопросы составляют общую *проблему измерения*.

В научном сообществе в попытке разобраться с ней сталкиваются различные интерпретации. Согласно исторической точке зрения, известной как копенгагенская, квантовые суперпозиции — всего лишь абстрактные математические инструменты, которые используются только для предсказания конечного результата эксперимента. В облаке присутствия частицы нет ничего конкретного, это просто умозрительная концепция для расчета вероятности получения того или иного результата. Однако в течение XX века многие физики критиковали такую интерпретацию, из-за чего появились новые и, быть может, более удовлетворительные модели.



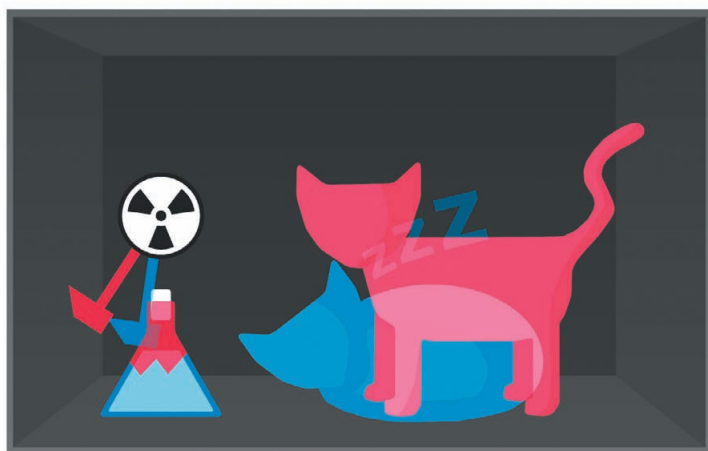
Кот Шрёдингера: проблема измерения в наших масштабах

Чтобы подчеркнуть проблему измерения и недостатки классической копенгагенской интерпретации, физик Эрвин Шрёдингер в 1935 году придумал мысленный эксперимент под названием «Кот Шрёдингера». Возможно, вы уже знакомы с одной из его вариаций.

Кота закрывают в коробке, внутри которой находится колба со снотворным. В оригинальном эксперименте Шрёдингера колба содержала яд, но, чтобы не нагнетать обстановку, давайте скажем, что в ней находится снотворное. Над колбой располагается молоточек, соединенный с механической системой, из-за которой он может прийти в движение и разбить пузырек, а может и остаться на месте. Сама система полностью завязана на радиоактивном атоме, чей распад носит квантовый характер: атом находится в суперпозиции как целого, так и распавшегося состояния, поэтому мы не знаем заранее, вызовет ли он выброс снотворного.

В начале эксперимента сосуществуют две возможные «реальности»: атом представляется целым и распавшимся одновременно. Но поскольку он связан со снотворным, все объекты в коробке (включая кота)

оказываются в состоянии запутанности с атомом. Вся коробка находится в масштабной квантовой суперпозиции: в одном варианте кот спит, а атом распался, однако в другом животное бодрствует и атом цел. До того как вы откроете коробку, невозможно предсказать, что вы там обнаружите. В итоге вы увидите либо то, что кот бодрствует, либо то, что он спит.



Вопрос Шрёдингера заключается в следующем: когда именно кот «выбирает» свое состояние? Когда мы открываем коробку? До этого? После?

Его мысленный эксперимент вызвал множество споров в научном сообществе. Многие считают квантовые суперпозиции не более чем математическими инструментами, не имеющими никакого отношения к осязаемой реальности. Другие говорят, что суперпозиции здесь не может быть вовсе, потому что коробка — это макроскопический объект и законы квантового мира на нее не распространяются. Иные предполагают, что устройство, спутывающее атом и кота, можно рассматривать как измерительный прибор, а потому суперпозиция пропадает, как только его вводят в эксперимент.

В любом случае механизм декогеренции скрывает суперпозицию еще до того, как мы открываем коробку; независимо от того, заглядываем мы внутрь или нет, коробка постоянно взаимодействует со своим

окружением посредством воздуха, света или тепла. Но тогда остается вопрос: что случилось с той суперпозицией, которую мы больше не можем наблюдать? Исчезла ли она? Существует несколько вероятных интерпретаций, и на данный момент мы не можем сказать наверняка. В конце концов, когда мы открываем коробку, кот либо бодрствует, либо спит, как бы мы это ни интерпретировали. Точку зрения, которую мы рассмотрим далее, можно назвать одной из самых удовлетворительных (во всяком случае, она моя любимая). Не все с ней согласны, но многие физики находят ее особенно изящной.



Многомировая интерпретация

А что, если после открытия коробки кот и спит, и бодрствует одновременно? В этом и заключается суть многомировой интерпретации. Только представьте...

Квантовая физика учит нас, что объекты оказываются в состоянии запутанности, когда входят в контакт друг с другом. Их квантовые суперпозиции притягиваются и соединяются. Но что мешает вам «спутаться» с радиоактивным атомом? Довольно волнующая мысль, вы не находите? Если вы откроете коробку, чтобы пронаблюдать за ее содержимым (которое находится в состоянии квантовой суперпозиции), вы тоже станете квантовым! Как и кот, вы окажетесь спутаны с устройством и будете существовать в суперпозиции. Ситуация кажется абсурдной, ведь в некотором смысле в квантовой суперпозиции существовали бы две реальности: одна, в которой вы видите бодрствующего кота, и другая, где вы находите спящее животное. Другими словами, в этот момент существуют две параллельные версии вас самих, ведущие две совершенно независимые жизни! Звучит неправдоподобно, но именно такое предположение выдвинул Хью Эверетт в 1957 году.

Согласно Эверетту, человек — такой же объект, как и любой другой, и так же, как кот, он может смешаться с окружением и в свою очередь стать квантовым. Для него суперпозиции остаются ощутимыми и конкретными, они так и не исчезают. Все варианты продолжают существовать параллельно и меняться независимо друг от друга, будто множество альтернативных реальностей. Это и есть многомировая интерпретация. Такое

Даже при таком взгляде на мир странности квантового мира остаются незримыми в нашем масштабе. Декогеренция вездесуща и почти мгновенно скрывает от нас любую форму квантовых случайностей. Как и в других интерпретациях, законы квантовой физики не вмешиваются в наш масштаб, и к нему применима только привычная нам классическая физика. Параллельные вселенные, если они вообще существуют, были бы совершенно независимыми ответвлениями нашей собственной. Их было бы невозможно обнаружить или достичь, а декогеренция не позволила бы им вторгнуться в нашу собственную реальность.

может показаться немыслимым, но только представьте: в этот самый момент параллельно с нашей может существовать огромное количество других вселенных, находящихся в рамках гигантской суперпозиции, среди которых существуют и другие ваши версии! Возможно, некоторые из ваших «воплощений» никогда не открывали эту книгу. Другие могли бы оказаться юристами, метателями копья, астронавтами или даже — кто знает? — дельфинами. В пределах возможного любые вселенные, которые вы только в силах себе представить, способны существовать параллельно с нашей.

Несмотря на столь ошеломляющий характер всей интерпретации, ей не нужно подчиняться редуктивным положениям о квантовом облаке. Больше нет необходимости постулировать что-либо в терминах измерения или наблюдения, ведь квантовые суперпозиции не исчезают вовсе! Объекты просто взаимодействуют друг с другом, как диктует уравнение Шрёдингера, и постепенно порождают огромное дерево сценариев, которые развиваются параллельно. Как мне кажется, такая интерпретация особенно красива в вопросе той смиренности, к которой она нас подталкивает. Наша планета или Солнце не представляют собой ничего особенного в масштабах Вселенной, поэтому возможно, что наш мир в целом — тоже не один в своем роде. На гигантском древе всех возможностей Вселенная, какой мы ее знаем, была бы лишь одной ветвью среди бесконечного множества других... Но, разумеется, есть и другие интерпретации.

Различные интерпретации

Загадочная квантовая физика позволяет нам вычислять результаты экспериментов, не описывая тех явлений, которые к ним приводят. Чтобы связать математику с реальностью, существует несколько возможных интерпретаций.

Копенгагенская школа

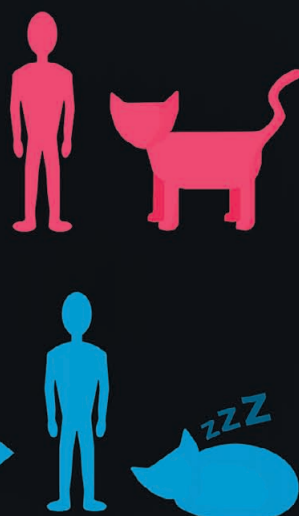
Это общепринятая интерпретация квантовой механики. В ней суперпозиции рассматриваются как абстрактные инструменты для прогнозирования результатов измерений. Наблюдатель играет здесь особую роль: измеряя квантовый объект, он вынуждает его выбрать одно из возможных состояний, причем происходит это случайным образом.

Предложенная в 1927 году концепция до сих пор считается наиболее авторитетной, но появились и другие модели.



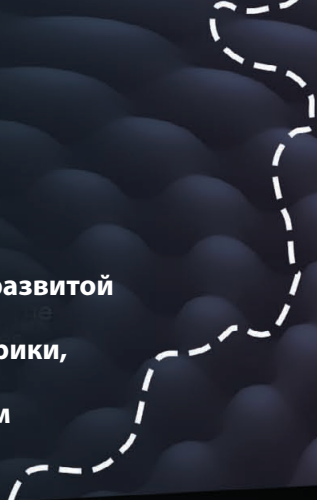
Множественные миры

По Эверетту, квантовые состояния не сходятся в одно. Вселенная — это огромная суперпозиция, в которой все вероятности происходят параллельно. Когда производится измерение, оно разветвляется на столько версий, сколько существует возможных результатов.



Волна-пилот

В разработанной Луи де Бройлем и развитой Дэвидом Бомом теории частицы рассматриваются как маленькие шарики, скользящие по квантовым волнам. Они следуют по точным траекториям и имеют четко определенные положение и скорость.



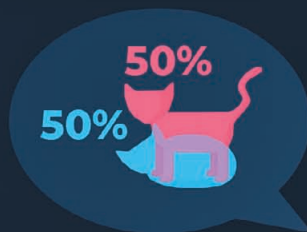
Объективная редукция

Некоторые физики считают коллапс суперпозиций вполне реальным явлением. Изменив уравнения, они описывают квантовые волны, которые сокращаются независимо от наблюдателя. Такие механизмы можно проверить экспериментально.



Квантовое байесианство (QBism)

Согласно этой интерпретации, квантовые явления не описывают реальный мир. Вероятности не относятся к квантовым объектам как таковым, а характеризуют нашу степень уверенности насчет возможного исхода.



Столкнувшись с подобными вопросами, многие физики предпочитают агностическую точку зрения и придерживаются собственных наблюдений. Математика демонстрирует результаты, и, быть может, нет необходимости подбирать для них толкования.

12 Ряд квантовых странностей

В начале XX века квантовая механика произвела переворот в устоявшемся представлении о мире. В ее основе лежат удивительные принципы вроде облака вероятностей или квантовой суперпозиции, из которых следует множество феноменов. В этой главе я предлагаю взглянуть на некоторые из таких явлений, ведь каждое из них выглядит удивительнее предыдущего...



Квантование энергии: происхождение слова «квант»

В конце XIX века физики столкнулись с серьезной проблемой. Когда они пытались посчитать мощность теплового излучения нагретого тела (например, куска расплавленного металла), расчеты указывали на бесконечный запас энергии. С физической точки зрения это был полный абсурд, но прийти к удовлетворительному решению никто не мог. Проблему назвали «ультрафиолетовой катастрофой», но ее масштаб осознали не сразу и предпочли проигнорировать. Кельвин считал ее не более чем «крошечным облачком на бескрайнем голубом небе физики», однако ради разгадки тайны этого «облачка» нам потребовалось бы полностью пересмотреть теории и предпосылки квантовой физики.

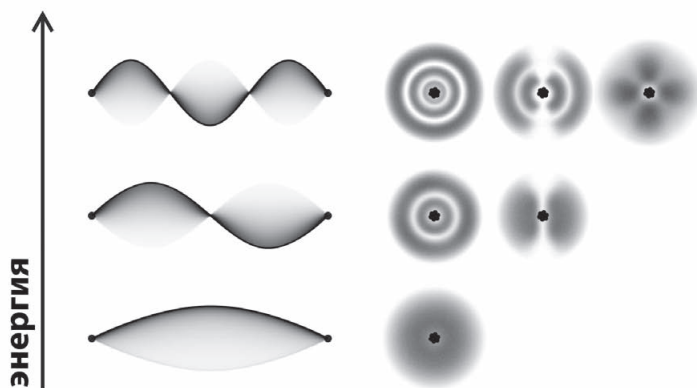
В 1900 году, на заре нового века, немецкому физику Макс Планку пришла в голову блестящая идея: а что, если материя испускает свое излучение небольшими порциями, крошечными мерами энергии? Основываясь на этой гипотезе, Планк решил загадку: излучаемая нагретым телом энергия перестает быть бесконечной, если ее разложить на конечное число маленьких порций. Несколько лет спустя настала очередь Эйнштейна, и он выдвинул следующую гипотезу: а что, если «раздробить» можно само излучение? Он представил, что свет состоит из микроскопических

гранул энергии. Шел 1905 год, и Эйнштейн только что открыл фотоны. Его находка принесла ему докторскую степень в области теоретической физики и Нобелевскую премию.

Вот и вся история. Но как именно происходит квантование энергии? Чтобы точно разобраться в вопросе, потребуется математика, но основная идея довольно проста: в микроскопическом мире энергия очень часто состоит из маленьких неделимых порций. Например, материю составляют крошечные строительные блоки (частицы), а внутри атомов электроны могут принимать только определенные энергетические уровни. Такое «разбиение», оно же квантование, лежит в основе формирования молекул и всей химии. Без него Вселенная была бы гораздо менее интересной!

На самом деле, квантование энергии — это простое следствие уравнения Шрёдингера, которое описывает распространение вероятностей на манер волны.

Представьте, что между двумя точками натянута резинка. Как и гитарная струна, резинка не может вибрировать произвольно: она вынуждена колебаться наравне с целым рядом волн — ее сопровождает одна волна, две, три и так далее. Ее энергия «квантована» и может принимать только определенные частоты. Оказывается, с позиции квантовой физики то же самое относится к электронам, и они ведут себя подобно волнам внутри атомов. Притягиваясь к ядру, они скрепляются у его окружности, как резинка между двумя точками. По этой причине электроны могут принимать только определенные энергетические уровни.





Принцип Гейзенберга: фундаментальная неопределенность

Когда частица не подвергается наблюдению, ее вероятные положения волной распространяются в пространстве. Теоретически частица может материализоваться в любой точке своего облака присутствия, но чем более оно рассеяно, тем больше неопределенность, и наоборот: чем более ограничено облако, тем неопределенность меньше. Мы знаем, что частица обязательно появится в этой небольшой области пространства.

Но что произойдет, если мы попытаемся определить не положение частицы, а ее скорость? Движение частицы может существовать в состоянии суперпозиции, не поддающейся определению до момента наблюдения. Оказавшись в положении рассеянного облака, частица не имеет четко определенной скорости или направления, пока распространяется в пространстве. Но когда появляется наблюдатель, она вынуждена «выбрать» направление движения, поэтому существует неопределенность в отношении ее скорости.

В 1927 году Вернер Гейзенберг, один из основателей квантовой механики, сформулировал любопытное свойство, которое стало известно как *принцип неопределенности*. Он выдвинул предположение, что неопределенности положения и движения частицы неразрывно связаны. Когда положение частицы хорошо выявлено (в крайне плотном облаке), ее движение обязательно будет неоднозначным! И наоборот, частица, движение которой точно известно, непременно сохранит высокую степень неопределенности своего положения. Позиция и скорость «дополняют» друг друга, и невозможно точно рассчитать обе величины. Это явление объясняется волнообразным поведением квантовых вероятностей. Можно провести аналогию с волнами на воде.

Представьте, что вы стоите на берегу озера и наблюдаете за волнами, пока те накатываются на песок. Волны следуют точной траектории и движутся от внутренней части озера к суше. Но их положение крайне рассеяно, и определить их позицию в одной точке не получится: волны достигают берега повсюду. Теперь представьте, что вы окунаете руку в воду и генерируете круговые концентрические волны. На этот раз искажения явно локализованы: они находятся близко к вашей руке.

С другой стороны, их движение становится совершенно рассеянным, и вокруг вашей руки волны распространяются во всех направлениях сразу. Оказывается, то же самое происходит и с квантовыми волнами.



Квантовые флуктуации в вакууме: действительно ли вакуум пуст?

Еще одно удивительное следствие квантовой физики состоит в том, что вакуум Вселенной в некотором смысле нельзя считать по-настоящему пустым... На самом деле существует еще одна связь неопределенностей между энергией физической системы и ее развитием: когда квантовая система изменяется крайне быстро, точно определить содержащуюся в ней энергию не получится.

В качестве примера представим, что мы наблюдаем за неподвижной частицей, которая быстро распадается (скажем, за истинным кварком). Время ее жизни бесконечно мало: кварк распадается менее чем за миллиардную долю миллиардной доли микросекунды. Но какова его энергия? Если бы вы попытались ее измерить, квантовая физика выдала бы вам неопределенный результат. Энергия кварка принципиально неточна: поскольку вы наблюдаете ее лишь краткий миг, квантовая физика допускает ее незначительные колебания. Разумеется, такие отклонения чрезвычайно малы, порядка 1%, но они существуют.

Когда речь заходит о квантовом вакууме, этот принцип имеет далеко идущие последствия. Он учит нас, что если мы наблюдаем за каким-либо процессом в течение крайне короткого времени, то все происходит так, как если бы вакуум постоянно вызывал флуктуации в пространстве — они и способствуют физическим явлениям. Существование таких квантовых флуктуаций можно проверить в лаборатории: например, на две металлические пластины, расположенные очень близко друг к другу, действует некая сила (или давление), которая толкает их ближе. Наблюдается так

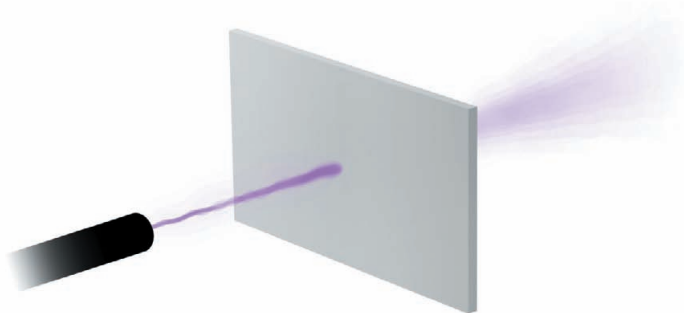
называемый эффект Казимира. Квантовые флуктуации в вакууме оказывают силу на внешнюю сторону пластин и вынуждают их сближаться.



Туннельный эффект: как частица может пройти сквозь стену

Вы когда-нибудь пытались пройти сквозь стену? В мире книг о Гарри Поттере волшебники попадают на платформу 9¾, когда решительно шагают прямо в стену. Но, если вы так же пойдете напролом в реальной жизни, приятного будет мало. Эта идея может показаться абсурдной, но нечто подобное все же осуществимо в масштабах частиц в рамках *туннельного эффекта*.

Когда привычный нам шарик соприкасается со стенкой, он просто отскакивает назад. Но квантовые частицы при распространении ведут себя как диффузные облака, поэтому все происходит гораздо сложнее. По мере приближения к стенке потенциальное присутствие частицы рассеивается в пространстве, и, если ее облако достаточно диффузно (или стена достаточно тонка), оно может в какой-то мере проникнуть за ее пределы. Вероятность присутствия частицы, таким образом, перетекает за препятствие. Если мы попытаемся пронаблюдать за ней, она сможет материализоваться именно там, как будто преодолев преграду.



Разумеется, в масштабах частиц стены не существует. Но как только возникает естественный барьер, который должен препятствовать их

распространению, проявляется этот эффект. Он наблюдается повсеместно и лежит в основе многих явлений.

Например, туннельный эффект необходим для ядерного синтеза, который происходит в самом сердце Солнца при выработке энергии. Преобладающая температура в 15 миллионов градусов недостаточно высока для прямого слияния атомных ядер, и они постоянно отталкиваются друг от друга благодаря электромагнитным силам. К счастью, протоны способны преодолевать этот барьер благодаря туннельному эффекту — без него не светило бы Солнце и жизнь на Земле никогда бы не зародилась!

С 1980-х годов туннельный эффект также используется в микроскопии. Крошечный металлический наконечник служит для зондирования образца вещества: когда зонд находится достаточно близко к объекту, туннельный эффект позволяет электронам в образце «перескакивать» на наконечник. Измеряя получившийся электрический ток, можно определить расстояние, отделяющее зонд от исследуемого объекта, а при его перемещении по всей поверхности получается определить и ее геометрию. Крайне мощная техника позволяет нам «видеть» атомы по отдельности.

Однако не стоит надеяться, что и мы вскоре сможем проходить сквозь стены: туннельный эффект возникает только в случае крайне тонких преград, не толще атома. Само собой, в наших масштабах он отсутствует вовсе.



Применение на практике

Лазер

В 1917 году Эйнштейн открыл процесс вынужденного излучения. Благодаря квантовой физике мы можем устранить возбуждение атома, осветив его конкретным фотоном, от которого будет выпущена его идентичная копия. Именно на этом принципе основана работа лазеров: фотоны заключают между двумя зеркалами и вызывают их последовательное движение в обе стороны, генерируя все больше и больше света. Свет от лазера идеально когерентен, ведь все фотоны в нем идентичны.



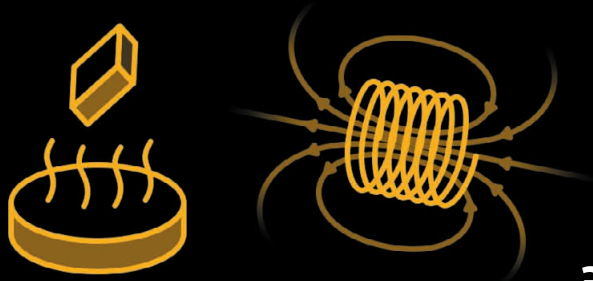
Сверхтекучие жидкости

Все жидкости обладают различной вязкостью. Например, мед более вязкий, чем вода. Но если охладить жидкий гелий до температуры, близкой к абсолютному нулю ($-273,15^{\circ}\text{C}$), происходит любопытное явление: жидкость больше не обладает вязкостью. Облака атомов сливаются вместе и образуют гигантскую квантовую волну. Такая «сверхтекучая» жидкость может перемещаться по стенкам чаши или по дну керамического чана без потери энергии, а также образовывать водовороты, которые будут вращаться бесконечно.



Сверхпроводники

Подобно сверхтекучим жидкостям, некоторые вещества при охлаждении образуют так называемые сверхпроводники. Крайне перспективные материалы переносят электричество без потерь, так как у сверхпроводников нет электрического сопротивления. К примеру, сейчас они широко используются в МРТ-оборудовании для создания мощных магнитных полей, а поездам на магнитной подушке они позволяют левитировать над рельсами.



Электроника

В XX веке при помощи квантовой физики было разработано множество новых технологий. Целый ряд современных инструментов — от транзисторов до ноутбуков — никогда бы не увидел свет, если бы нам ничего не было известно о некоторых ее явлениях. Вы знали, что для сохранения файлов на USB-накопителях используется туннельный эффект?



Квантовые вычисления

Современные компьютеры работают в двоичном режиме. Всё кодируется в битах, которые могут принимать только два значения — 0 или 1. Но сейчас исследователи пытаются разработать новый тип информатики, чтобы расширить диапазон наших возможностей. Квантовые вычисления полагаются на феномен суперпозиции, а сам квантовый бит — это суперпозиция состояний 0 и 1. Технология все еще находится в зачаточном состоянии, но ее головокружительный прогресс сулит массу революционных применений.

13

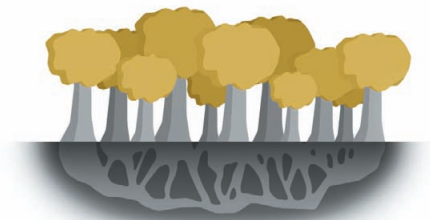
Квантовые поля

Почему все электроны обладают одинаковой массой? Как взаимодействуют частицы, когда они сливаются, поглощаются или распадаются? Квантовая механика начала XX века не давала ответов на эти вопросы, и начиная с 1940-х годов физики приняли новый вызов: построить модель, которая объединила бы квантовый мир и специальную теорию относительности. Так появилась квантовая теория поля. Оказавшись в центре современных исследований, она стала для квантовой механики тем же, чем общая теория относительности была для специальной, — более широкой системой, которая охватывает новые явления и предлагает углубленное видение Вселенной...



Частицы и ураганы на карте ветров

Вы когда-нибудь слышали о Пандо? Этот тополиный лес, расположенный в штате Юта на западе США, который обладает уникальной особенностью: когда наступает осень и температура снижается, все деревья в нем желтеют в одно и то же время! 50 000 тополей ведут себя одинаково, как будто они полностью идентичны.

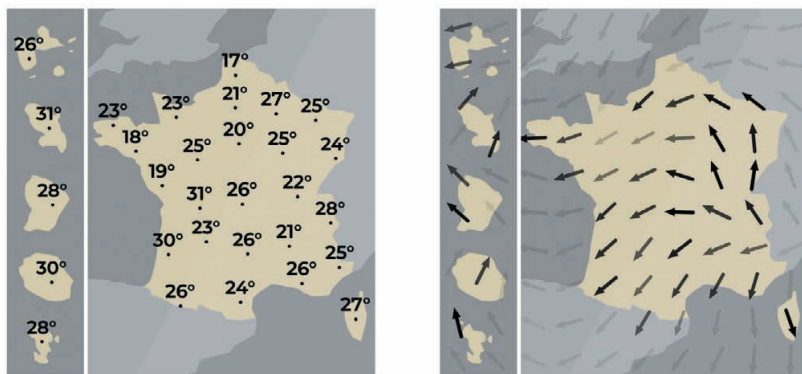


Феномен объясняется довольно увлекательным образом. Пандо — не совсем лес. Да, он состоит из множества деревьев, но на самом деле он представляет собой огромную клональную колонию, самую большую в мире. Образующие ее тополя объединены системой подземных корней, из-

за чего весь лес предстает целостным живым существом. Возраст Пандо составляет 80 000 лет, а вес — почти 6000 тонн. Вполне возможно, что это самая старая и тяжелая форма жизни на Земле.

Как и в случае с Пандо, частицы одного семейства в действительности могут быть не более чем поверхностными признаками единого объекта. Например, все электроны выступают лишь проявлениями одной и той же базовой сети — «электронного поля», которое заполняет все пространство. Эта гипотеза объясняет, почему они имеют одинаковую массу или заряд: перед нами свойства не самой частицы, а поля, из которого она возникает. То же самое относится и ко всем частицам Стандартной модели: кварки, нейтрино, бозоны Хиггса связаны с отдельными полями, локальными проявлениями которых они и становятся. Поэтому существуют кварковые поля, нейтринные поля и так далее.

Но что же такое поле? В повседневной жизни мы представляем поле как большой участок земли, на котором в каждой точке что-то посажено (например, подсолнухи). Аналогичным образом математическое поле — это область, которая заполняет все пространство, где в каждой точке расположен некий математический объект. Метеорологические карты, которые показывают по телевизору, изображают такие же поля, и на карте изменения температур каждой точке страны присваивается число (температура). Иначе говоря, перед нами числовое поле. А карта ветров, которая указывает направление и скорость ветра в каждой точке, — это поле стрелок, или, как говорят в математике, векторное поле.



Концепция квантовой теории поля состоит в том, чтобы описать элементарные частицы как искажения внутри этих математических полей. Подобно многочисленным вихрям на карте ветров, частицы представляют

Хотя эта теория была разработана в 1940-х годах, сама идея не нова. Еще в 1865 году Джеймс Клерк Максвелл понял, что электричество и магнетизм представляют собой две грани одного и того же явления (электромагнетизма), а свет стоит считать волной на поверхности поля, лежащего в его основе (электромагнитного поля). С открытием фотонов полвека спустя мы узнали, что энергия поля квантуется: квантовые поля могут содержать только целое число энергетических порций... то есть частиц.

собой локализованные колебания внутри более спокойной среды. При таком подходе формируется целая математическая структура: существует столько же полей, сколько и семейств частиц, и физики наполняют их различными математическими объектами, чтобы описать их вариативное поведение. Итак, некоторые поля состоят из чисел, другие — из векторов, третьи — из еще более загадочных элементов...



Различные типы полей

В квантовой механике пространство и время рассматривались так же, как и в классической физике, то есть как абсолютные и неизменные образования, внутри которых движутся частицы. Но в свете открытий Эйнштейна возникла проблема: вселенная квантовой механики несовместима с пространством-временем теории относительности. Как, например, можно описать частицу, движущуюся со скоростью света? Здесь явно необходима стандартизация.

При разработке квантовой теории поля физики XX века совершили настоящий научный подвиг, когда объединили мир частиц с пространством-временем специальной теории относительности. В новой модели пространство и время больше не считались абсолютными, их роли стали взаимозаменяемыми. В соответствии с принципами теории относительности квантовые поля подчиняются лоренцевой геометрии — той самой, которую Минковский несколькими десятилетиями ранее использовал для формализации теории Эйнштейна.

Пока ученые пытаются согласовать квантовый мир с теорией относительности, квантовая теория поля приоткрывает завесу над множеством тайн. Например, она позволяет лучше понять принцип исключения, который четко различает бозоны и фермионы. Но теория относительности Эйнштейна устанавливает ограничения на типы полей, которые можно применить для описания реальности, и в них разрешается использовать только определенные объекты.

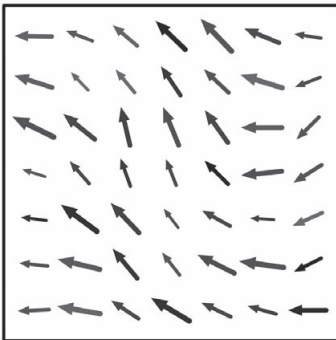
Числа

-1	30	27	1	17	9	7
22	-3	13	13	9	20	16
28	17	3	20	6	17	15
27	29	4	28	18	10	13
28	6	27	13	18	8	19
3	26	10	18	15	19	7
-2	-5	-4	17	18	17	20

Простейшие поля состоят из чисел. Хорошим примером можно считать метеорологические карты, где каждой точке пространства присваивается температура, то есть число. Здесь числа выступают абстрактными объектами, и они не зависят от ориентации: на карте температур не нужно указывать север или юг, чтобы увидеть величину для каждого города. По той же причине физики говорят, что числа — это

объекты с нулевым спином. К примеру, бозон Хиггса как частица с нулевым спином описывается в рамках числового поля.

Векторы



Возьмите ручку и поверните ее. В отличие от чисел, у ручки есть ориентация в пространстве: она направлена в определенную сторону. Физики приписывают таким объектам спин 1 — они возвращаются в исходное состояние только после того, как совершат полный оборот. Здесь мы рассматриваем вектор как геометрический объект, направленный в определенную сторону. Поля фотонов, Z- и W-бозонов, а также глюонов — это векторные поля. Все они подчиняются тому же правилу, что и ручка: если повернуть фотон, он вернется в исходное состояние после полного оборота.

Спиноры



Как оказалось, теория относительности позволяет использовать третий, более экзотический тип объектов для создания полей. Куда менее известные и гораздо более странные спиноры не возвращаются в исходное состояние после совершения полного оборота. Чтобы они вернулись в прежнее положение, нужно два оборота. Таким объектам приписывают спин $\frac{1}{2}$. В качестве аналогии можно представить,

что вы взяли карту ветров, раскрутили ее и после одного полного оборота направление стрелок перестало совпадать с изначальным. Столь абстрактные объекты можно применять для моделирования фермионов, частиц материи. Спинорными полями описываются электроны, кварки и нейтрино.



Антиматерия

В попытке примирить уравнение Шрёдингера и специальную теорию относительности Поль Дирак в 1928 году сделал невероятное открытие. В своих вычислениях он обнаружил целое собрание еще неизвестных частиц, которые потенциально могли бы существовать. Новые частицы, хоть и идентичные обычным, способны обладать противоположным электрическим зарядом. Согласно уравнению, у каждой частицы есть «партнер», близнец с противоположным зарядом. Мы называем их «античастицами». С помощью математики Дирак сумел открыть доселе неизвестную форму материи, а четыре года спустя первая частица антиматерии была обнаружена экспериментально. Наша Вселенная таит в себе антиэлектроны, антикварки и антинейтрино.

Антиматерия уже раскрыла многие свои тайны. Мы знаем, как генерировать ее в ускорителях частиц, а в некоторых лабораториях ее даже удается сохранить в течение нескольких дней. Достичь такого результата нелегко, ведь, когда античастица встречается с обычной частицей, они обе мгновенно аннигилируют и выделяют невероятное количество энергии! Хранение античастиц означает их максимальную изоляцию с целью избежать

Материя возвращается в прошлое?

В 1940-х годах Ричард Фейнман предложил удивительную интерпретацию природы антиматерии. По его мнению, античастицы — это обычные частицы, которые путешествуют назад во времени, будто перемотанная пленка. Фейнман показал, что если бы они странствовали по Вселенной в обратном направлении, то вели бы себя точно так же, как если бы у них были противоположные заряды. На самом деле обе ситуации эквивалентны: мы можем сказать, что античастицы либо противоположно заряжены, либо это обычные частицы, путешествующие назад во времени. Такой тезис предоставляет изрядную пищу для размышлений... Но будьте осторожны, не увлекайтесь фантазиями: перед нами прежде всего математическое измышление, которое не затрагивает то, как устроен мир.

любого контакта с внешним миром: они удерживаются в левитирующем состоянии с помощью умных систем магнитных полей в почти идеальном вакууме. Но в природе антиматерия встречается крайне редко. В связи с этим возникает главный вопрос: почему этой формы вещества, на первый взгляд идентичной обычной, попадается так мало? Исследователи предполагают, что какой-то еще неизвестный механизм мог нарушить былую симметрию сразу после Большого взрыва, сыграв на руку материи, а не антиматерии. Однако эту загадку еще предстоит разгадать...



Виртуальные частицы: когда материализуется вакуум

Что, если бы вас попросили назвать какое-нибудь уравнение в физике? Уверен, вы знаете хотя бы одно:

$$E = mc^2$$

Прославленное Эйнштейном уравнение облетело весь мир и стало символом науки. Но что оно означает на практике?

По сути, формула Эйнштейна говорит нам о том, что энергия и материя могут быть преобразованы друг в друга. В частности, она учит нас, что энергия способна реорганизоваться в материю и воплощаться в виде частиц. Собственно, именно для этого и существуют ускорители частиц: провоцируя столкновения крайне высоких энергий, ученые вызывают появление новых частиц для их дальнейшего изучения.

Но в рамках квантовой механики мы увидели, что вакуум пространства не бывает пустым: он постоянно искажается различными флуктуациями, поэтому даже самые спокойные зоны всегда находятся в возбуждении. Вакуум содержит вездесущую вероятность распределения энергии, которая только и ждет возможности материализоваться.

В квантовых полях в самых пустых уголках Вселенной всегда кишат частицы в неопределенном состоянии существования, которые стремятся проявиться. Такие потенциальные частицы, не присутствующие осязаемо, постоянно показываются по всей Вселенной, но они совершенно эфемерны. Их время жизни слишком коротко, чтобы их можно было обнаружить, — они так и остаются простыми вероятностями, преходящими флуктуациями, которые нельзя считать реальными частицами. Физики называют их *виртуальными частицами*.

Вопрос существования виртуальных частиц стал предметом философских дебатов, поскольку многие ученые вполне обоснованно предполагают, что это не более чем инструменты для расчетов, не имеющие отношения к конкретной реальности. Тем не менее они очень полезны для моделирования и познания некоторых осязаемых явлений. В следующей главе мы узнаем, что именно в такой виртуальной форме бозоны действуют как переносчики взаимодействия реальных частиц на расстоянии.

14 Квантовые взаимодействия

Наша Вселенная завораживает своей динамичностью: в ней всё меняется, а частицы постоянно движутся, появляются или исчезают. Но удивительно, что этот сложный механизм стал результатом всего четырех взаимодействий — гравитации, электромагнетизма, а также слабого и сильного взаимодействий. С помощью квантовой теории поля физикам удалось идеально описать три из четырех фундаментальных типов такой связи.



Взаимодействие: когда частицы играют с мячом

Вполне возможно, вы уже сами наблюдали какие-нибудь удивительные физические явления. Когда сталкиваешься с ними впервые, невольно задумываешься о волшебстве. Я отчетливо помню, как пытался свести вместе два магнита. По мере их сближения моим рукам приходилось прилагать все больше усилий, и казалось, что невидимая пружина только сильнее удаляет магниты друг от друга. Но почему два отстоящих предмета отталкивались, даже не вступая в контакт? Этот вопрос долгое время не давал мне покоя.

Давайте начнем с небольшой истории...

Представьте, что по какой-то причине вы с приятелем оказались посреди большого озера, наполненного смертоносной кислотой. К вашему великому отчаянию, две лодки стоят совершенно неподвижно на расстоянии нескольких метров, из-за чего вы не можете добраться друг до друга. Нет ни течения, ни ветра, способного подтолкнуть лодку. Подобно конькобежцу на идеально скользком льду или астронавту, затерянному в вакууме космоса, вы не можете привести себя в движение, ведь у вас нет никакой опоры. А раз весла расплавились в кислоте, вы вынуждены стоять на месте...

К счастью, на дне вашей лодки есть важный предмет, который может всё изменить: надувной пляжный мяч. В порыве озарения вы хватаете его и со всей силы бросаете в сторону другой лодки. Гениальный ход способен спасти вас обоих! Когда вы отпускаете мяч, лодка начинает двигаться в обратную сторону, и, пока мяч летит вперед, ваше судно плывет назад, к берегу. Это та же сила, которую чувствует стрелок при выстреле из пистолета, то есть принцип действия-противодействия. Механизм его работы настолько практичный, что его используют в аэрокосмической промышленности для запуска ракет. Вы спасены! Ваша лодка, которая ранее была неподвижной, теперь дрейфует к берегу!



Но ваш друг все еще в опасности, и ему нужно поймать мяч. К счастью, вы хорошо прицелились, поэтому предмет летит по воздуху, пересекает озеро и попадает прямо в руки вашему товарищу. Когда он ловит мяч, он поглощает его импульс и движется назад, а его лодка начинает медленно дрейфовать к суше.

Эта история может показаться экстравагантной, но она хорошо отражает то, как взаимодействие между частицами передается на квантовом уровне. Представьте, что вы поместили два неподвижных электрона в вакуум. Они изначально статичны, как те лодки на кислотном озере, и кажется, что они обречены оставаться в таком состоянии. Но в квантовой физике вакуум не бывает пустым: квантовые поля постоянно кишат виртуальными частицами! Они действуют подобно мячу, которым вы перекидывались на озере, и могут появляться «из ниоткуда», а электронам удастся взаимодействовать на расстоянии и отталкиваться друг от друга посредством обмена такими частицами.



Так у нас получится лучше понять, как частицы взаимодействуют на расстоянии. Электроны могут быть неподвижными и изолированными, но они постоянно погружены в квантовые поля, пронизанные флуктуациями и населенные виртуальными частицами. Когда появляется виртуальный фотон, он заимствует свое движение у одного из электронов и вынуждает его двигаться назад, а затем его поглощает второй электрон. Фотон существовал лишь краткий миг, поэтому мы не в состоянии его обнаружить, но его присутствие оставило крайне важный след: он выступал в роли переносчика электромагнитного взаимодействия и успел передать движение между двумя частицами. Нам кажется, что электроны отталкиваются друг от друга на расстоянии, но на самом деле их взаимодействие становится результатом постоянного обмена виртуальными частицами.

Почему некоторые частицы притягиваются друг к другу?

Представим, что вместо мяча вы нашли на дне лодки бумеранг. На этот раз, чтобы ваш друг смог его поймать, бумеранг нужно бросить в другую сторону: вы должны направить его к берегу так, чтобы после поворота в воздухе его траектория достигла другой лодки. Теперь отдача подтолкнет вас не к берегу, а к другу, потому что вы бросаете бумеранг в другую сторону. В квантовом масштабе виртуальные частицы также могут действовать как бумеранги, создавая противоположные эффекты отдачи: в то время как одни частицы отталкиваются друг от друга, другие притягиваются. Так происходит с частицами с противоположными зарядами, например, с электроном и позитроном.

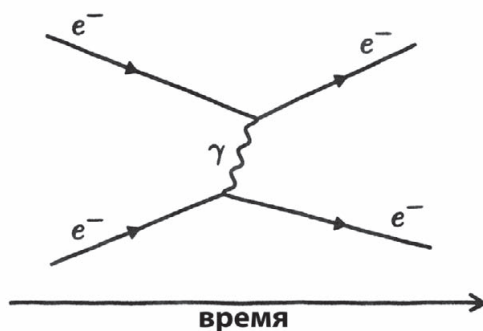


Диаграммы Фейнмана: рисунки не так просты, как кажется

Квантовая теория поля описывает множество новых явлений: частицы появляются, исчезают, взаимодействуют, притягиваются или отталкиваются друг от друга, и все это вытекает из того, как движутся и контактируют квантовые поля. Но сопутствующие вычисления были столь утомительными и трудоемкими, что весь этот громоздкий свод математических формул тормозил прогресс. К счастью, все изменилось в 1948 году, когда Ричард Фейнман разработал новый блестящий инструмент для вычислений — диаграммы Фейнмана.

Научное сообщество быстро осознало их революционную ценность, ведь незамысловатые на первый взгляд рисунки значительно упростили решение уравнений! С помощью диаграмм Фейнмана можно не изучать сложную динамику самих полей, напоминающую поведение жидкости или вибрирующей эластичной ткани, а разбивать поля на частицы, которые в них содержатся. Такой подход дает более интуитивное представление о некоторых процессах.

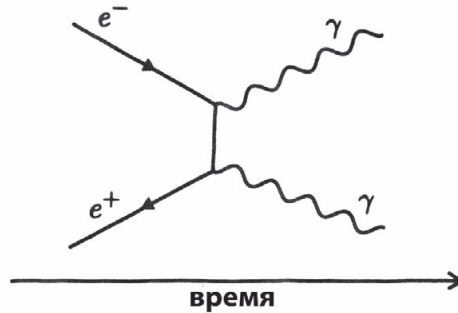
По сути, каждая диаграмма отображает сценарий или последовательность, где прослеживается столкновение нескольких частиц. Например, на одной из самых известных схем показаны два электрона при обмене виртуальным фотоном.



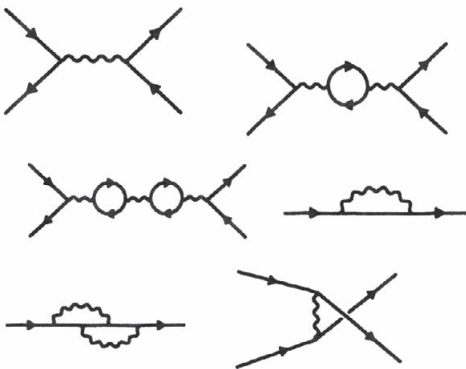
На диаграммах частицы представлены линиями, которые показывают их траекторию во времени. Сплошные линии указывают на электроны,

волнистая — на фотон. Мы видим, что два электрона перемещаются из прошлого в будущее, обмениваются фотоном и затем продолжают свой путь.

На другой диаграмме показано, как электрон и позитрон (антиэлектрон) встречаются и аннигилируют, образуя два фотона.



На этой схеме позитрон движется в противоположном направлении, будто бы из будущего в прошлое. Не забывайте, что, согласно Фейнману, антиэлектрон можно представить как электрон, идущий назад во времени. Но проще сказать, что стрелка символизирует электрический заряд позитрона, который противоположен заряду электрона.



Приняв определенные ограничения, можно мигом увлечься и придумать множество более или менее сложных схем. Скажем, электрон способен аннигилировать с позитроном, а затем восстановиться, и такое может произойти два или три раза подряд.

Еще электрон в силах испустить фотон, а затем вновь поглотить его, или же испустить

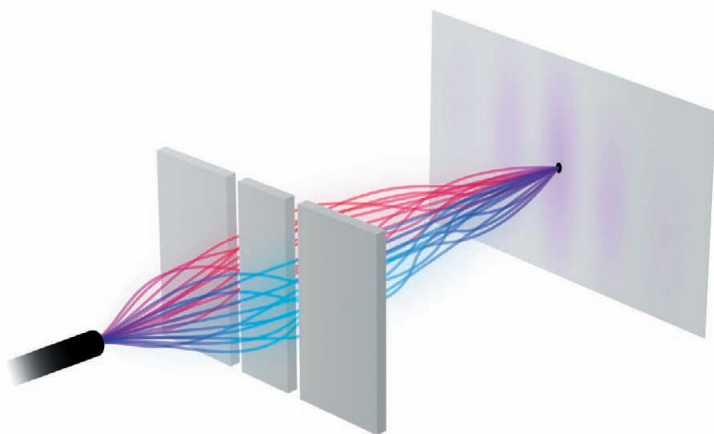
два. При соблюдении некоторых базовых правил возможны все мыслимые схемы, и каждая из них представляет собой сценарий, который необходимо учитывать при расчете динамики квантовых полей.



Сумма путей, или Как количественно оценить поле

Диаграммы Фейнмана отражают вполне традиционный взгляд на мир частиц: они представлены в виде маленьких шариков, движущихся по очень точным траекториям. Очевидно, что-то здесь не так: куда делись все странности квантовой механики?

Мы знаем, что в квантовом мире вероятное присутствие частиц распространяется как волна. Например, оно может проходить через две щели одновременно. Но Фейнман видит вещи иначе: до того, как частица достигнет перегородки, всё происходит так, как если бы ее присутствие одновременно «прощупывало» все возможные пути. Частица проверила бы все траектории, пройдя и те, что идут через левую щель, и те, что затрагивают правую. Такая точка зрения вполне функциональна и ведет к прогнозируемым вероятностям в конце эксперимента.



Фейнман понял, что этот принцип на самом деле более общий и в том числе он применим к квантовой теории поля. Как частицы движутся в суперпозиции всех возможных траекторий, так и квантовые поля будут меняться в суперпозиции всех возможных сценариев.

В математике интеграл — это сумма бесконечного числа объектов, обычно чисел. Но в квантовой физике рассматриваемый нами интеграл представляет сумму сценариев. В нем объединяются все возможные пути и временные последовательности. Наша Вселенная как будто учитывает все возможности, какими бы невероятными они ни были...

Что-то похожее произошло бы, если бы мы включили телевизор и увидели метеорологическую карту, на которой показаны несколько температур в каждой точке, как будто несколько карт были наложены друг на друга. В отличие от классических полей, квантовые поля движутся по всем возможным сценариям одновременно. Некоторые из таких сценариев имеют большую или меньшую вероятность, взаимно противодействуют, некоторые усиливаются, а другие уничтожаются и нейтрализуют друг друга. Короче говоря, все возможные «истории» в большей или меньшей степени способствуют их итоговому синтезу.

Поэтому, как ни удивительно, описание реальности квантового мира требует от нас учета всех диаграмм Фейнмана сразу. Такие схемы не соответствуют конкретным событиям — перед нами всего лишь «слои», кусочки общего результата, которые нужно собрать вместе и сложить, чтобы увидеть «реальную» динамику Вселенной. Этот удивительный принцип известен как *интеграл по траекториям*.

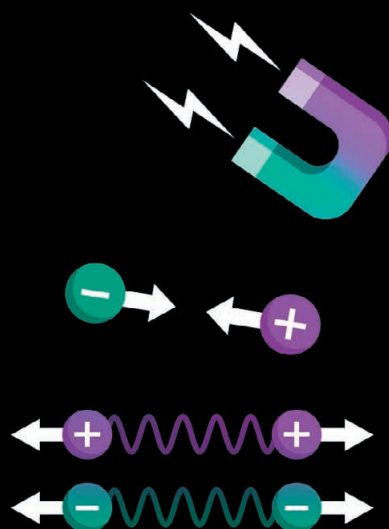
С учетом подобного формализма квантовая теория поля дает самые достоверные прогнозы за всю историю физики. Наиболее известный из них, «аномальный момент электрона», подтверждается экспериментами с точностью до более десяти цифр после запятой! Это самая мощная модель для описания почти всех явлений во Вселенной, но, как вы понимаете, просчитать бесконечное количество сценариев — задача не из легких... Математические нормы системы до сих пор плохо изучены, и ученые продолжают работать над тем, чтобы она стала более методичной. Кроме того, сама неполная модель несовместима с общей теорией относительности и не учитывает одну из четырех фундаментальных сил во Вселенной — гравитацию.

Четыре вида взаимодействий во Вселенной

Электромагнетизм

Этот тип можно назвать одним из самых известных — только благодаря ему мы можем осмыслить большинство явлений, с которыми сталкиваемся в повседневной жизни. Среди них электричество, свет, магнетизм, а также химия и оптика.

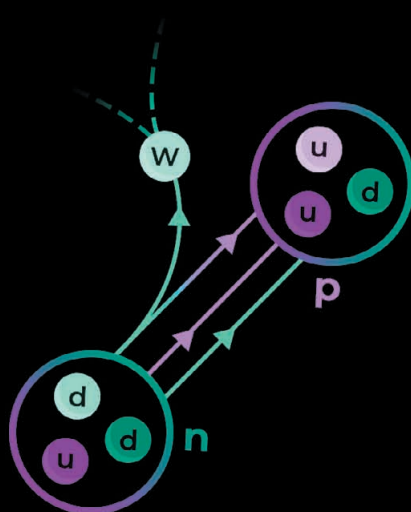
С помощью виртуальных фотонов частицы с противоположными электрическими зарядами притягиваются друг к другу, а частицы с одинаковыми зарядами отталкиваются. При взаимодействии суммарный заряд всегда сохраняется.



Слабое взаимодействие

Слабое взаимодействие — наиболее трудноуловимая из трех квантовых сил — куда менее известно. Оно вызывает целый ряд эффектов, но в основном ответственно за радиоактивность.

Через замену Z- и W-бозонов кварки можно модифицировать и, например, превращать нейтрон в протон. Как и в случае с электрическим зарядом, с этой силой связан другой постоянный заряд: слабый изоспин.

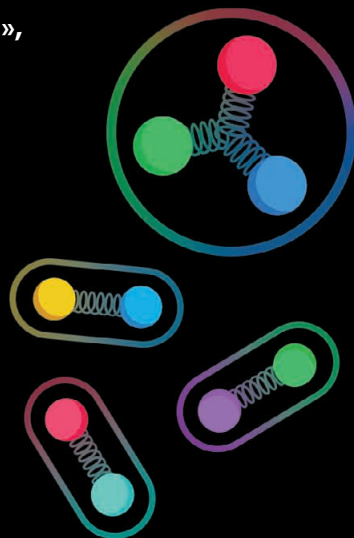


Сильное взаимодействие

Третье взаимодействие — самое мощное из всех. Оно осуществляется в масштабах атомного ядра и объясняет, как кварки связываются вместе, образуя частицы вроде протонов и нейтронов.

У кварков есть еще один заряд — «цветовой», который может принимать три значения: красный, зеленый или синий. Разумеется, с реальными цветами он не имеет ничего общего, эти названия служат лишь в качестве аналогии. В природе они никогда не встречаются по отдельности: кварки всегда объединяются в группы и образуют скопления белого цвета. К примеру, в протоне есть кварк каждого цвета, потому что красный + зеленый + синий = белый.

Кварки также могут соединяться с антикварками, у которых есть антицвет: антикрасный, антизеленый или антисиний. Передавая виртуальные глюоны, они постоянно обмениваются цветами и преобразуются от одного к другому, из-за чего продолжают удерживаться вместе. Здесь мы говорим о хромодинамике, переменчивости цветов.



Гравитация

Гравитация — самое слабое взаимодействие во Вселенной, проявляющееся только в масштабах наиболее массивных звезд.

В наши дни ее принято рассматривать как следствие кривизны пространства-времени, но квантовая теория не в состоянии смоделировать ее природу на уровне частиц. Из-за этой проблемы исследователи разрабатывают новые теории, чтобы примирить гравитацию и квантовый мир.







НА ПУТИ К ЕДИНОЙ ТЕОРИИ?



В XX веке физикам-теоретикам пришла в голову идея: а что, если бы мы были в силах описать всю Вселенную с помощью одной модели?

После ошеломляющих успехов, достигнутых в рамках общей теории относительности и квантовой теории поля, исследователи задались вопросом, может ли существовать некая универсальная концепция, «теория всего», где объединились бы все наши познания для описания Вселенной?

Мысль об этом возникла не на пустом месте. Она таится в самом сердце физики, ведь наука всегда стремится выявить универсальные законы. Уже в 1687 году Ньютон прибегнул к первой крупной стандартизации: с помощью своей теории о всемирном тяготении он свел вместе свободное падение тел и движение планет. Менее чем через два столетия Максвелл объединил законы электричества и магнетизма и понял, что цельная теория (электромагнетизм) способна объяснить оба явления. Стандартизация ведет к пониманию, и поиски решения достигли апогея в XX веке. С развитием Стандартной модели и квантовой теории поля почти все физические явления можно было описать с помощью единой парадигмы.

Но, несмотря на ослепительный прогресс физики, квантовая теория поля не учитывает четвертый тип взаимодействия — гравитацию. Видение мира, которое содержится в общей теории относительности, несовместимо с предписаниями квантовой физики, а их математические концепции кажутся совершенно непримиримыми. Результаты вычислений, предпринимаемых в попытках свести их воедино, уходят в бесконечность, и избежать этого никак не выходит. Загадки всё не заканчиваются...

Существуют ли другие частицы? Почему антиматерия встречается так редко? Что происходит в центре черной дыры? Откуда берется темная энергия? Почему масса бозона Хиггса столь мала?

Если мы хотим исследовать Вселенную в самых ее экстремальных уголках, где гравитация встречается с квантовым миром, то нам необходима стандартизация. На момент написания этой книги ни одна теория еще не доказала свою полную состоятельность, но разработка ряда подходов продолжается. В третьей, заключительной части, я предлагаю вам познакомиться с наиболее перспективными гипотезами...

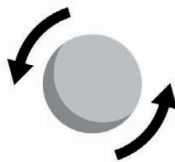
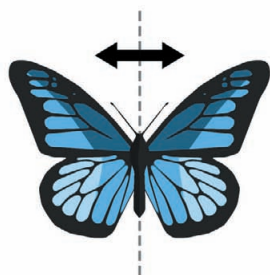
15 Симметрии, универсальная формальная система

В 1915 году, в разгар Первой мировой войны, немецкий математик Эмми Нётер продемонстрировала теорему, которая произвела революцию в теоретической физике. Тезис Нётер, описанный Эйнштейном как «монумент математической мысли», подразумевает, что некоторые законы Вселенной вытекают из базовых симметрий. Благодаря ее идее родился новый способ сформулировать физические положения...



Симметрии: ключевое понятие

Симметрия — ключевое понятие в современной физике. Скорее всего, вы уже имеете о ней какое-то представление. К примеру, бабочка симметрична зеркально: по обе стороны от центральной оси ее крылья одинаковы, и каждое из них похоже на отражение другого. Но это не единственный возможный вид симметрии.



Так, идеально гладкий шар симметричен вращательно и не меняется при обороте вокруг своей оси, а бесконечно длинная струна сохраняет единый вид, если перемещается вдоль оси, — она симметрична трансляционно. Мы имеем дело с симметрией, когда объект остается неизменным вопреки оказываемому действию.

В XX веке физики обнаружили, что законы физики также основаны на симметриях. Неважно, рассматриваем ли мы теорию относительности или квантовую физику: мы можем понять Вселенную путем изучения ее неизменности.



Законы сохранения: следствия симметрий

Бросьте перед собой мяч. На Земле после броска он быстро упадет: существует предпочтительное направление, асимметрия между направлениями «вверх» и «вниз», обусловленная гравитацией. Но теперь бросьте мяч в вакуум космоса, вдали от звезд. В пустоте межзвездного пространства у мяча не будет причин падать в одном направлении вместо другого. Больше нет понятия «вверх» или «вниз», все направления равноценны, поэтому мяч полетит прямо и сохранит траекторию движения. Это и есть принцип инерции, с которым вас могли познакомить в школе. Как и конькобежец на идеально гладком катке, объект, на который не действует никакая сила, ровно скользит по пространству-времени.

Теорема Нётер помогает понять происхождение этого «закона»: перед нами далеко не фундаментальный принцип, а всего лишь следствие симметрии. В отсутствие сил Вселенная везде одинакова, и законы физики не меняются на протяжении ее траекторий, поэтому у мяча нет причин отклоняться от прежнего направления движения. В каждый момент времени он ведет себя так же, как и в предыдущий, и продолжает двигаться по прямой — это происходит за счет неизменности Вселенной!



На самом деле идея носит весьма общий характер, и ее можно применить ко всем схожим правилам. Сохранение энергии, импульса или даже электрического заряда — все эти законы напрямую вытекают из симметрий, будь то симметрии самого пространства-времени или содержащихся в нем квантовых полей.



Относительность: теория, основанная на симметрии

Как мы уже видели, специальная теория относительности обозначила поворотный момент в истории науки. Ее влияние было таким революционным из-за вытекающих из нее выводов, но эта теория также оказалась первой моделью, которая полностью опиралась на симметрию. В ее основе лежит мысль о том, что законы физики одинаковы во всех инерциальных системах отсчета (в них любое тело, на которое не действуют силы или действующие силы скомпенсированы друг другом, покоится или движется равномерно прямолинейно), а скорость света всегда должна оставаться неизменной. Из этого единственного положения вытекает вся теория и сопутствующий ей набор новых явлений. Весь свод странных законов, от сокращения длин до растяжения времени, в конечном итоге становится не более чем следствием симметрии!

В течение XX века ученые продолжали двигаться в том же направлении, пытаясь обнаружить новые симметрии для построения своих моделей. Положения, связанные с неизменностью, превратились в путеводную нить современной физики при анализе Вселенной. Сегодня и Стандартная модель, и общая теория относительности основаны на симметриях.

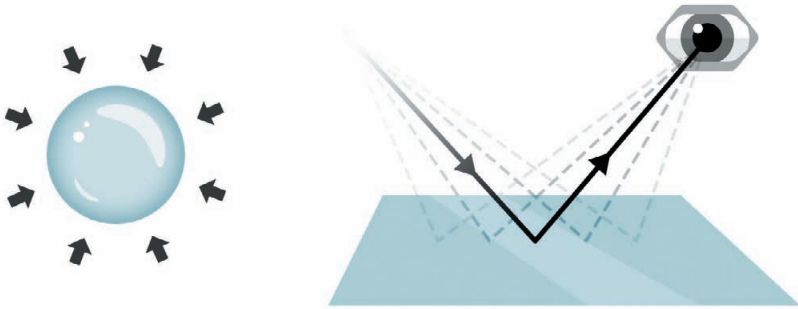


Принцип наименьшего действия: когда Вселенная ленился

Чтобы переписать существующие модели в терминах симметрий, физики обратились к основополагающему положению: принципу наименьшего действия. Проще говоря, природа ленива и всегда стремится найти самое простое решение, и, если где-то присутствует симметрия, она предпочитает ее не нарушать. Довольно радикальная мысль применима

вплоть до общей теории относительности: у объектов нет причин отклоняться от своей траектории, они движутся прямо по «геодезическим»^{*} линиям в пространстве-времени, потому что предпочитают наиболее простые пути.

Принцип наименьшего действия предлагает нам по-новому взглянуть на физику. Мы больше не пытаемся спрогнозировать изменение системы во времени, а определяем ограничения, которым должна удовлетворять Вселенная, чтобы минимизировать свои «усилия». Законы Вселенной больше не диктуют ее изменчивость, а служат воплощением ее стремления к наименьшим стараниям. К примеру, в повседневной жизни мыльный пузырь стремится минимизировать площадь своей поверхности, а свет, отражаясь от зеркала, следует кратчайшему пути.



Этот принцип, заимствованный из классической физики, не вполне соблюдается в квантовой физике. В ее рамках мы можем считать, что все сценарии происходят параллельно в огромной суперпозиции, а частица не ограничена единственной траекторией: она распространяется как волна и проходит по всем путям одновременно. К счастью, ее образ действий нельзя считать абсолютно случайным: подобно более или менее прозрачным слоям копировальной бумаги, некоторые сценарии важнее других, и, даже если они все существуют в единой точке, самые простые

^{*} Некоторое обобщение понятия «прямая» для искривленных пространств. — Прим. науч. ред.

события (те, которые требуют наименьших «усилий») занимают большую долю в итоговом результате. На субатомном уровне Вселенная придерживается оптимального сценария.

Как бы то ни было, принцип, впервые изложенный в XVII веке, стал краеугольным камнем современной физики. В теории относительности, как и в квантовой теории, выявление законов Вселенной теперь сводится к определению «действия», то есть той величины, которая характеризует «усилие» Вселенной — именно его она постоянно стремится минимизировать.

$$S = \int \sqrt{|g|} d^4x \left(\frac{1}{2\kappa} R + \mathcal{L}_m \right)$$

$$S = \int d^4x \left(-\frac{1}{4} F^2 + i\bar{\psi} \not{D} \psi + |\mathcal{D}_\mu \phi|^2 - V(\phi) + (\bar{\psi}_L \hat{Y} \phi \psi_R + h.c.) \right)$$

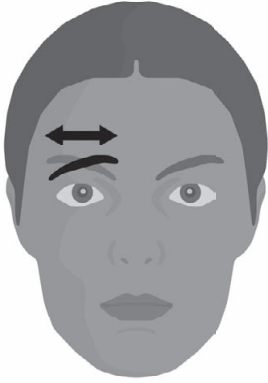
Действия в общей теории относительности и в Стандартной модели. Первая формула выражает теорию Эйнштейна, а вторая — взаимодействие фермионов и внешних полей.



Локальные симметрии: происхождение взаимодействий

Представьте себе идеально симметричное лицо. Если посмотреть на него с помощью зеркала, то лицо будет выглядеть идентичным по отношению к самому себе. Перед нами так называемая «глобальная симметрия»: лицо остается неизменным, когда располагается как единое симметричное целое. Точно так же глобальным симметриям подчиняется наша Вселенная, и, если мы одновременно переместим все точки в ней или повернем всю Вселенную вокруг своей оси, ничего не изменится. Такие симметрии распространяются на весь космос, однако в течение XX века физики обнаружили практическую ценность нового, более ограниченного типа — локальной симметрии.

НА ПУТИ К ЕДИНОЙ ТЕОРИИ?

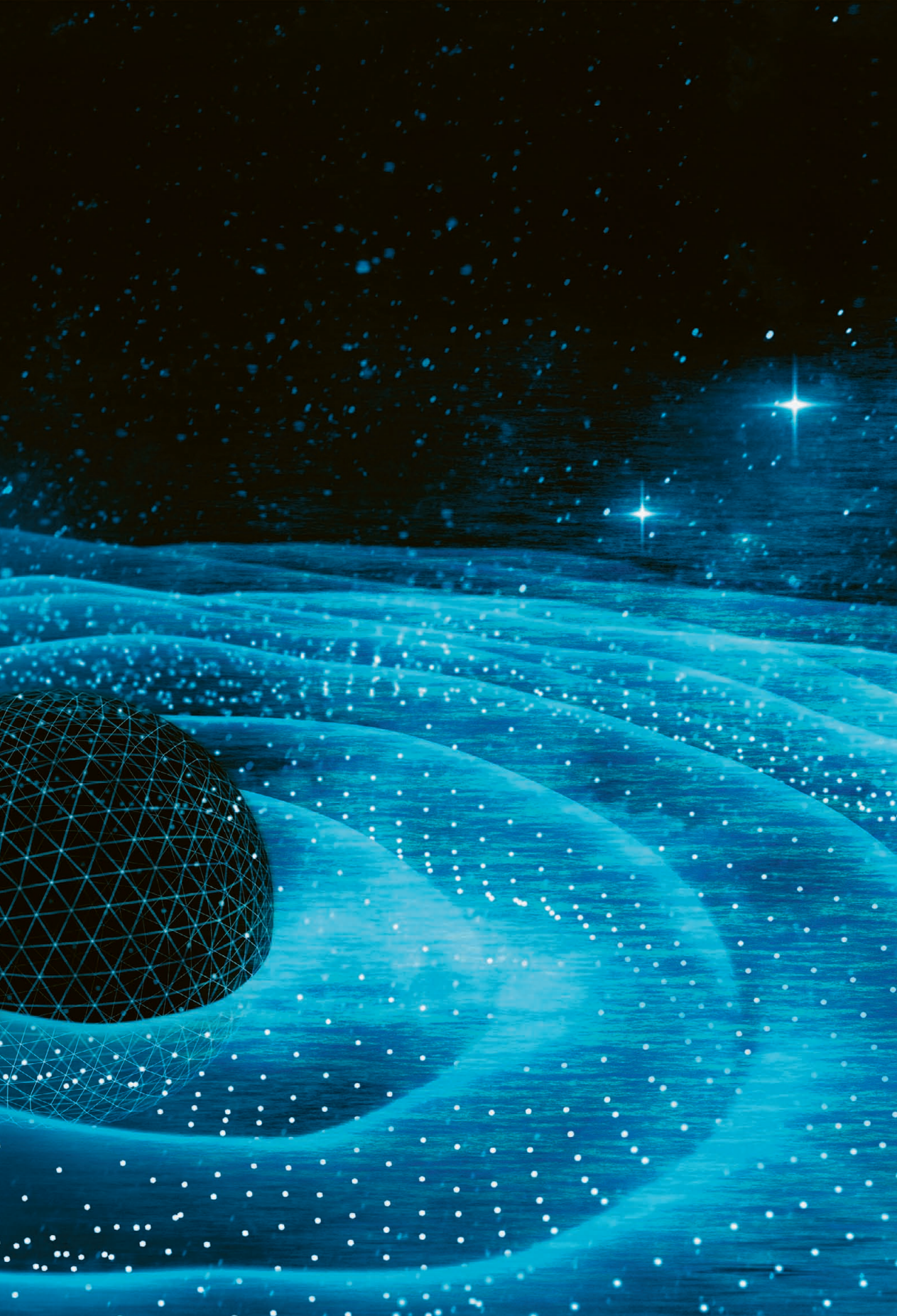


Давайте снова взглянем на уже упомянутое лицо и представим, что на этот раз мы сосредоточились на конкретной области, например, на правой брови. Хотя лицо в целом симметрично, бровь таковой не кажется: она расположена на лице чуть наискосок.

Если бы бровь стала симметричной без преобразования остальных частей лица, разница оказалась бы заметна. Хотя лицо неизменно глобально, нельзя сказать то же самое в локальном отношении:

каждая составляющая часть не может измениться независимо от остальных.

Локальные симметрии более ограниченные. Они требуют, чтобы каждая точка во Вселенной могла подвергнуться изменению независимо от остальных. В случае теории относительности локальная симметрия позволяет каждому наблюдателю поместить себя в свою собственную систему отсчета, что легло в основу понятия кривизны пространства-времени и дало начало общей теории относительности. В рамках Стандартной модели локальные симметрии привели к существованию фотонов, глюонов, Z- и W-бозонов в самом фундаменте взаимодействий. Присущая квантовым полям базовая инвариантность известна как «калибровочная», и из нее вытекает вся сложность Стандартной модели. В некотором смысле четыре фундаментальные силы нашей Вселенной стали следствиями симметрий.



Симметрии пространства-времени

Перемещение

Законы физики не меняются при перемещении из одной точки в другую. Эта симметрия приводит к прямолинейному движению изолированных тел.



Вращение

Все направления эквивалентны. Законы физики не меняются в зависимости от ориентации, из-за чего тела сохраняют свое вращательное движение.



Время

Законы физики не меняются с течением времени от одного мгновения к другому. Из этой симметрии следует сохранение энергии.



Инвариантность уравнений

Для того чтобы законы физики были инвариантны и наблюдателю не нужно было вводить мнимые силы (такие, как гравитация), в математике появилась новая структура: кривизна пространства-времени.



Симметрии квантовых полей

Калибровочная инвариантность

На карте Земли принято указывать север наверху, однако это произвольное решение: карту можно читать в любом направлении. То же самое происходит и в физике: чтобы описать некоторые свойства частиц, необходимо произвольным образом определиться с ориентацией. В таком случае речь идет о «калибровочных» параметрах. Как и при работе с картой, наши представления о мире можно «поворачивать», не затрагивая реальность, которую они описывают. Такие преобразования и становятся симметриями в наших теориях.

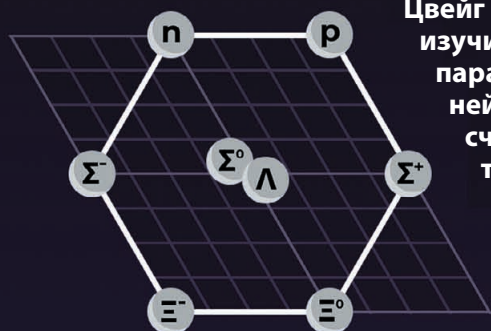


$U(1) \times SU(2) \times SU(3)$

Стандартная модель подчиняется симметрии, состоящей из трех элементов: $U(1)$, $SU(2)$ и $SU(3)$. Они известны как *калибровочные группы*. В совокупности эти абстрактные симметрии обуславливают существование трех взаимодействий квантового мира: электромагнетизма, а также слабого и сильного взаимодействий. Поскольку частицы чувствительны к разным симметриям, на них действует та или иная сила.

Открытие кварков

В 1964 году физики Марри Гелл-Ман и Джордж Цвейг сделали невероятное открытие: изучив симметрии некоторых измеряемых параметров, они предположили, что нейтроны и протоны (которые ранее считались элементарными) состоят из трех меньших объектов — кварков. Существование таких тел было подтверждено лишь спустя несколько лет. Эти частицы удалось открыть благодаря симметриям.



16 Суперсимметрия

В процессе выявления все более сложных видов симметрии физики XX века погружались во внутренние механизмы космоса. Но, начиная с 1960-х годов они начали задумываться о том, что Стандартная модель может быть неполной... Все ли симметрии во Вселенной нам удалось обнаружить? Именно тогда некоторые ученые выдвинули предположение о существовании новых частиц, порожденных иной симметрией — так называемой суперсимметрией.



Еще одна симметрия: вариантов меньше, чем мы думаем

В 1967 году Сидни Коулман и Джеффри Мандула опубликовали крайне важную статью в области квантовой теории поля. Два исследователя показали, что выявленные до сих пор симметрии (относящиеся к специальной теории относительности и Стандартной модели) следует считать единственными типами симметрии, которым способна подчиняться Вселенная. Их теорема несла в себе важный посыл: если принять некоторые ее гипотезы, то окажется, что Стандартную модель нельзя расширить новыми видами симметрии. В таком случае мы бы уже определили все симметрии, которым в принципе может соответствовать Вселенная.

Но всего несколько лет спустя, в 1971 году, физики Юрий Гольфанд и Евгений Лихтман заметили недостаток в теореме Коулмана и Мандулы, ведь те предположили, что все симметрии обязательно описываются числами. Тезис звучит разумно, поскольку он применим ко всем известным нам симметриям: например, вращение характеризуется углом наклона оси, то есть числом. Но для описания поведения частиц, а точнее фермионов, в квантовой теории поля используется другой тип математических объектов — числа Грассмана. Эти абстрактные единицы сильно отличаются от обычных чисел и используются для описания фермионных полей. Гольфанду и Лихтману пришла в голову блестящая идея: что,

Вопреки распространенному мнению, суперсимметрия — это не совсем теория как таковая. Перед нами лишь еще один тип симметрии, подобный вращательной или зеркальной, который потенциально может соблюдаться во Вселенной.

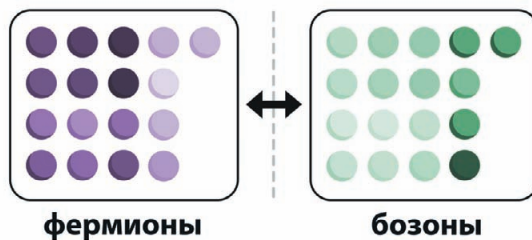
если разработать концепцию симметрии, основанную не на привычных числах, а на числах Грассмана?

С помощью нового вида симметрии два физика сумели обойти теорему Коулмана и Мандулы. Если допустить существование такого варианта, то Стандартную модель можно расширить и тем самым открыть новые частицы. Это и есть суперсимметрия.



За пределами Стандартной модели: суперпартнер для каждой частицы

Мысль, лежащая в основе понятия о суперсимметрии, довольно проста. Она постулирует, что Стандартная модель неполна и существует симметрия между фермионами и бозонами, материей и взаимодействиями. Говоря конкретнее, у каждой частицы в Стандартной модели будет свой суперпартнер с той же массой, но в другом семействе: так, у каждого фермиона будет партнер типа «бозон», а у каждого бозона — партнер типа «фермион». Например, появился бы селектрон, партнер электрона, или фотино, партнер фотона. Согласно этой гипотезе, на каждый известный фермион во Вселенной будет приходиться новый бозон, а на каждый известный бозон — новый фермион.



Суперсимметрия так интересна, потому что она способна приоткрыть завесу над множеством тайн.



Загадки темной материи

Благодаря космологическим моделям мы теперь знаем, что частицы Стандартной модели составляют лишь 15% материального содержимого Вселенной. Остальные 85% соответствуют пока неизвестной форме материи, невидимой и взаимодействующей с остальным веществом только посредством гравитации. Такая темная материя необходима Вселенной для формирования галактик в известном нам виде. Но, даже если удастся обнаружить ее и изучить ее поведение, фундаментальная природа темной материи так и останется неизвестной.

Возможно, решение поставленной задачи способна дать суперсимметрия. Она предполагает существование частиц с нужными свойствами, которые и составляют основу этой загадочной материи. Но пока вопрос остается открытым...



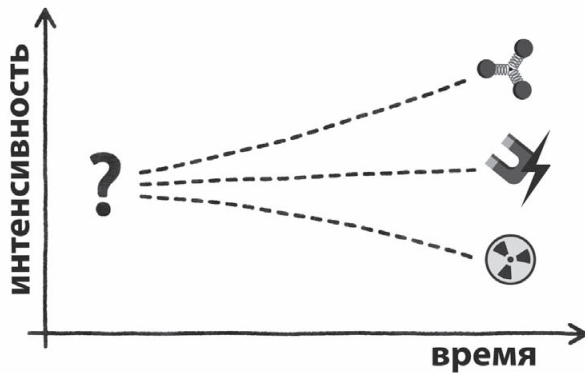
Великое объединение

Суперсимметрия также может помочь нам понять происхождение взаимодействий Стандартной модели. Физики предполагают, что в прошлом, во время Большого взрыва, когда Вселенная была очень горячей и бурлила энергией, три взаимодействия Стандартной модели: электромагнетизм, сильное взаимодействие и слабое — были сведены в единую силу. Это и есть Великое объединение. Со временем расширение Вселенной вызвало разрыв этой связи, что привело к появлению трех сил, известных нам сегодня.

Идея звучит привлекательно, и мы уже знаем, что она применима к двум взаимодействиям: электромагнетизму и слабому взаимодействию, которые раньше объединялись в единое «электрослабое взаимодействие».

Будьте осторожны и не путайте Великое объединение с «теорией всего». Первая концепция заключается в том, что три силы квантового мира возникли из единой симметрии в первые мгновения Большого взрыва. С другой стороны, «теория всего» относится к более масштабной мысли о том, что можно построить единую модель для описания всех явлений во Вселенной.

Увы, расчеты Стандартной модели указывают на то, что при возвращении к периоду Большого взрыва три силы сочетаются неидеально. Удивительно, но, когда в этот космический механизм добавляется суперсимметрия, равновесие восстанавливается и теперь можно представить себе общее происхождение трех взаимодействий.



Масса бозона Хиггса: проблема суперсимметрии

Когда была выдвинута гипотеза о суперсимметрии, ученые надеялись, что она сможет разрешить главную загадку и выявить массу бозона Хиггса, который в расчетах тесно взаимодействует с квантовыми флуктуациями вакуума. Бозон Хиггса как будто пытается пройти по толстому

СУПЕРСИММЕТРИЯ

слою снега: при пересечении вакуума ему нужно замедлиться и набрать колоссальную массу, но на практике она оказывается гораздо меньше. Почему теория так нас подводит?

Суперсимметрия могла бы дать ответ на этот вопрос. Если предположить наличие симметрии между фермионами и бозонами, с ее помощью восстанавливается равновесие во флуктуациях вакуума. Влияние виртуальных частиц компенсируется их суперпартнерами, что объясняет, почему бозон Хиггса обладает такой низкой массой.

Но, чтобы такое объяснение сработало, суперсимметричные частицы и их партнеры обязательно должны обладать схожей массой, иначе они не смогут уравнивать друг друга. В настоящее время суперчастицы еще не обнаружены — это говорит о том, что их масса непременно окажется довольно значительной: наши ускорители частиц еще не достигли порога энергии, достаточной для их появления. Другими словами, теперь мы знаем, что положения суперсимметрии не соблюдаются в ее наиболее точной форме. Если прогнозируемые ею частицы существуют, они обязательно должны обладать большей массой, чем частицы Стандартной модели, ведь в противном случае мы бы их уже обнаружили.

Но исследования продолжаются, и физики задаются вопросом, могла ли такая симметрия существовать во время Большого взрыва, после чего произошло ее дробление при расширении Вселенной. Это очень важный вопрос, поскольку суперсимметрия может оказаться единственным видом симметрий, способным обогатить Стандартную модель. Сейчас она лежит в основе многих моделей, в том числе посвященных супергравитации и теории струн. В целях ее обнаружения исследователи пытаются создать среду со сверхвысокими энергиями, аналогичную условиям Большого взрыва.

17 Квантовые черные дыры

Действительно ли черная дыра — черная? В 1974 году британский теоретик Стивен Хокинг открыл удивительное явление: он обнаружил, что черные дыры должны испускать очень слабое излучение. Такие тела постепенно испаряются, и их всё же нельзя считать черными. Когда гравитацию и квантовую физику не удастся примирить, случаются открытия, благодаря которым мы можем поближе рассмотреть объединяющие их явления.



Квантовые поля в искривленном пространстве-времени

Общая теория относительности основана на блестящей идее Эйнштейна о том, что содержимое Вселенной искажает ее геометрию. Пространство-время не сохраняется в виде неподвижной сетки: оно динамично и подвержено влиянию звезд. Именно эта кривизна и порождает гравитацию. Эйнштейн предполагал, что между материей и самой тканью космоса существует глубинное взаимодействие: геометрия = содержимое.

Но с появлением квантовой механики в 1920-х годах физики обнаружили, что содержимое Вселенной не так просто, как кажется. Материя, управляемая квантовыми вероятностями и суперпозициями, будто бы подчиняется принципам, которые полностью противоречат парадигме общей теории относительности.

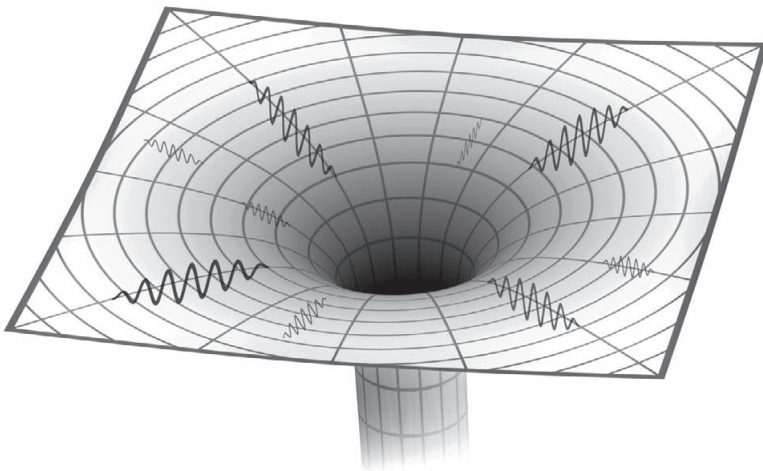
Как квантовые объекты, такие как частицы, влияют на геометрию пространства-времени? Считать ли само пространство-время квантовым? И когда частица находится в состоянии суперпозиции, то есть в двух местах одновременно, искривляется ли пространство-время в обоих местах?

В настоящее время эта проблема остается нерешенной. Наши модели позволяют в той или иной степени исследовать гравитацию вплоть до масштаба «планковской длины» (примерно $1,6 \times 10^{-35}$ метров), но ее фундаментальные механизмы на самых микроскопических уровнях остаются загадкой. На протяжении нескольких десятилетий исследователи пытались свести оба мира вместе и разработать модели квантовой гравитации, но решения пока не обнаружили...

И всё же физики не сидят без дела в ожидании рабочей модели. У них есть еще один выход: выдвигать приблизительные предположения. В 1974 году Хокинг заинтересовался поведением квантового поля в окрестностях черной дыры.

По всей строгости, содержащиеся в поле частицы должны оказывать на пространство-время чрезвычайно слабое искривляющее воздействие.

В силу отсутствия модели, описывающей такое явление, у физика не осталось другого выбора: ему пришлось пренебречь их гравитацией и считать, что частицы перемещаются по фиксированному пространству-времени, обусловленному общей теорией относительности. Его предположение оказалось крайне эффективным, поскольку черная дыра, масса которой в несколько раз больше массы Солнца, будет лишь незначительно зависеть от гравитации нескольких частиц. В упрощенной модели Хокингу удалось провести ряд расчетов, и он обнаружил одно беспрецедентное явление...

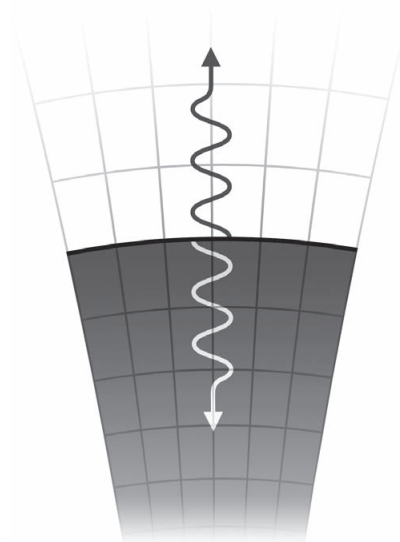




Когда материализуются виртуальные частицы

Как мы уже видели, в квантовой физике вакуум не бывает пустым. Даже самые свободные от материи области всегда находятся в состоянии возбуждения. Они кишат виртуальными частицами — эфемерными проявлениями энергии вакуума, которые постоянно появляются и исчезают. Подобно тому, как противоположные волны при наложении нейтрализуются, виртуальные частицы стремятся устранить друг друга, так что увидеть их практически невозможно. Но эти квантовые флуктуации вездесущи, и Хокинга интересовало их поведение в окрестностях черной дыры.

В общей теории относительности черная дыра — это гигантская область, внутри которой ткань космического пространства падает быстрее света. Если поблизости нет звезд, черная дыра представляет собой абсолютно пустой пузырь. Но в квантовой физике вакуум никогда не бывает пустым! Сверхмощная гравитация черной дыры тянет виртуальные частицы к ее центру — всё уносится вперед, как на конвейерной ленте, а сам вакуум находится в свободном падении. По мере ускоренного приближения квантовых флуктуаций к центру черная дыра растягивает их и искажает: виртуальные волны разделяются и перестают нейтрализовывать друг друга. Вакуум больше не пустует.



Через хитроумный расчет Хокинг показал, что именно излучают черные дыры. Их сильная гравитация превращает виртуальные частицы в реальные, и они скрываются в бесконечности. В каком-то смысле черные дыры испаряются: их масса постепенно уменьшается, когда происходит исторжение материализующихся частиц вакуума. Но в действительности это излучение до смешного слабое, его практически невозможно обнаружить. Нам пришлось бы ждать 10^{36} лет (в сто септиллионов раз больше возраста Вселенной) в надежде увидеть, как черная дыра потеряет хотя бы грамм массы! В настоящее время излучение Хокинга остается лишь теорией, но похоже, что математические расчеты подтверждают его существование.



Термодинамика черных дыр и информационный парадокс

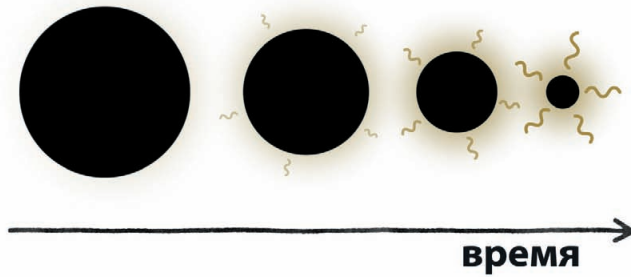
Благодаря открытию Хокинга мы поняли, что излучают черные дыры, и сумели описать их как нагретые тела, ведь им можно присвоить температуру. Совершенно неожиданно к черным дырам оказалась применима термодинамика — область физики, которая занимается вопросами тепла. Но их излучение крайне слабо выражено, а температура самых горячих черных дыр не превышает нескольких миллиардных долей градуса выше абсолютного нуля. Это значит, что они в миллиарды раз холоднее нити накаливания в лампочке.

Как вы считаете, излучение мощнее у больших черных дыр или у маленьких? Логично предположить, что самые горячие черные дыры должны быть и самыми крупными, поскольку в них больше энергии. Но формула Хокинга дает нам категоричный ответ: на самом деле интенсивнее всего излучают именно самые маленькие черные дыры! Это их свойство не так уж и удивительно. Крупные черные дыры гораздо больше, и на уровне их горизонта гравитация однородна и распределена по огромным расстояниям. Маленьким черным дырам, напротив, присущи довольно устрашающие свойства: их притяжение резко меняется от одной точки к другой. Черным дырам легче «разобщать» флуктуации вакуума, поэтому их излучение сильнее.

Такую характеристику можно считать беспрецедентной. В отличие от нити накаливания лампочки, которая остывает при выключении, черные

КВАНТОВЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

дыры нагреваются по мере своего истощения: их температура растет все больше и больше, а общее испарение ускоряется.



В связи с этим возникает теоретический вопрос: что произойдет, если черная дыра полностью испарится? Исчезнет ли она, вызвав масштабный всплеск радиации? Куда денутся все объекты, которые она поглотила? Нам придется навсегда забыть об их существовании? Но квантовая теория запрещает любую потерю информации, и происходящие события должны непременно оставлять следы. Тогда какие признаки останутся после исчезновения черной дыры? Перед нами «информационный парадокс», загадка, которую Хокинг пытался решить до последних дней своей жизни, вплоть до 2018 года. Вопрос до сих пор находится в центре внимания многих исследователей, и, для того чтобы досконально установить точные факты, нам потребуется четкая модель квантовой гравитации.

В этой области сосуществуют несколько теорий.

18 Теория струн и другие подходы

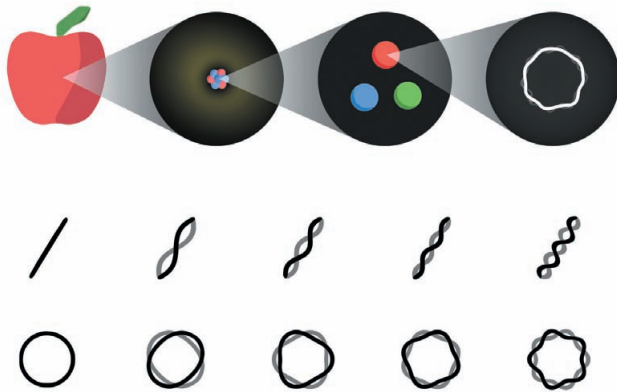
Вы когда-нибудь играли на гитаре? Если дернуть струну, она начинает вибрировать и издавать звук. Натянутая между двумя порожками струна может колебаться с движением одной волны, двух, трех и так далее. Каждая вибрация порождает свою ноту. Что, если бы то же самое происходило с частицами: если бы каждая частица была определенным колебанием крошечной вибрирующей струны? Столь элегантная и плодотворная идея привела исследователей к первой модели квантовой гравитации — теории струн.



Крошечные струны в состоянии вибрации

До начала XX века атомы и частицы представлялись микроскопическими гранулами материи, маленькими шариками, которые двигались как точки на фоне Вселенной. Но с появлением квантовой физики мы поняли, что всё не так просто. Частицы могут находиться в состоянии суперпозиции, в котором их положение оказывается размытым по облаку вероятностей. Но факт остается фактом: при наблюдении частицы загадочным образом материализуются в одной точке, как рассмотренные нами ранее шарики.

Главная мысль теории струн заключается в том, чтобы расценивать описание частиц как точек в качестве приблизительного образа, тогда как в действительности они состоят из крошечной «нити», или «струны», в миллиарды раз меньшей, чем тела, которые мы могли наблюдать до сих пор. Если увеличить масштаб материи, то всё, что мы увидели бы на данный момент (электроны, фотоны, кварки или нейтрино), оказалось бы не более чем субстанцией из вибрирующих мельчайших нитей энергии. Подобно натянутым эластичным лентам, эти «струны» колебались бы по-разному, придавая каждому типу частиц уникальные свойства.

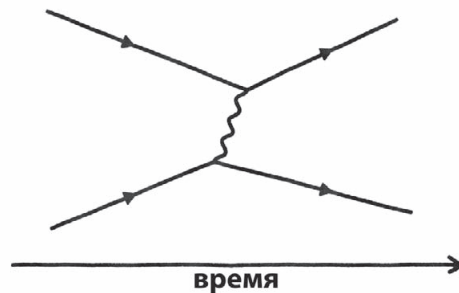


При помощи хитроумных математических процедур физикам удалось продемонстрировать, что такие струны могут вести себя как бозоны или фермионы, и таким образом выдвинуть потенциальное объяснение многогранности Стандартной модели!



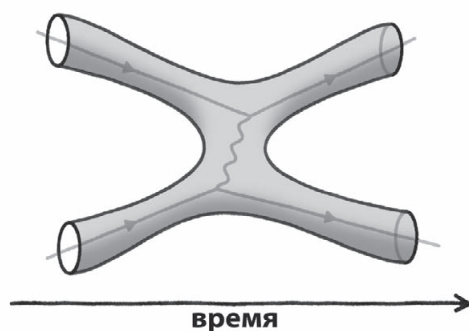
Взаимодействия и гравитоны: теория квантовой гравитации

Вы находитесь на пляже и проводите пальцем по песку, чтобы написать несколько букв. По мере того как ваш палец пробирается сквозь песчинки, он рисует кривую линию. Точно так же частицы в квантовой теории поля, рассматриваемые как безразмерные точки, прочерчивают линии по Вселенной. Их взаимодействие можно представить диаграммами Фейнмана.



Но теперь представьте, что вы разравниваете песок рукой. На этот раз оставленный след будет не линией, а толстой полосой. Точно так же в теории струн частицы больше не фигурируют как точки: составляющая их струна обладает некоторым размером и прочерчивает плотную линию на условной поверхности Вселенной, то есть в пространстве-времени.

Такие взаимодействия уже не выглядят как линии и точки, а скорее кажутся плавными поступательными переходами.



При рассмотрении суперпозиции всех возможных геометрий физики смогли описать квантовое взаимодействие между струнами и тут же выделили одно явление: они обнаружили способ вибрации, который приводит к возникновению гравитации при наблюдении струн в наших масштабах.

Пока еще гипотетическая частица, известная как гравитон, превратила теорию струн в перспективный вариант описания квантовой гравитации. Как и электромагнитные волны, состоящие из фотонов, гравитоны предположительно выступают маленькими крупицами гравитационных волн, крошечными «порциями» кривизны пространства-времени, которые движутся подобно квантовым струнам.

Если заменить частицы на струны, модель неожиданно воспроизводит принципы как квантовой физики, так и общей теории относительности. Она предоставляет нам описание гравитации на фундаментальном уровне! Объекты обмениваются друг с другом гравитонами и притягиваются друг к другу в результате таких реакций.



Десятимерная Вселенная

После ряда успешных положений многие исследователи обратили свое внимание на теорию струн, и она до сих пор остается наиболее исследованным подходом в поисках теории всего. Однако, несмотря на многочисленные достижения, теория струн столкнулась и со значительными трудностями.

Модель накладывает серьезные ограничения на Вселенную с целью произведения продуктивных математических вычислений. По всей видимости, теория струн работает только в том случае, если Вселенной присущи... десять измерений — одно временное, как в нашей Вселенной, и девять пространственных. Если дело обстоит именно так, то получается, что, помимо высоты, ширины и длины, наша Вселенная содержит еще шесть измерений пространства, которые мы никогда не видели.


Многим физикам трудно принять столь радикальную мысль, из-за чего подрывается изучение всей теории, но от этого модель не становится менее функциональной. Некоторые предполагают, что дополнительные измерения находятся за пределами нашей Вселенной, а мы лишь существуем в «секции» еще большего мира. Другие думают, что эти измерения сворачиваются сами в себя на микроскопических уровнях, и поэтому их невозможно обнаружить в нашем масштабе. Но существует множество различных способов такого «свертывания» измерений, и исследователи до сих пор не определили правильный подход, который привел бы к появлению известных нам частиц.

Теория струн все еще неполна, и на сегодняшний день ее невозможно проверить экспериментально. Тем не менее, несмотря на частую критику, она остается одной из самых перспективных моделей для описания гравитации в квантовом масштабе и объединения двух столпов современной физики.

На следующих страницах я приглашаю вас открыть для себя мир струн в картинках, а также познакомиться с другими кандидатами на упорядочение двух систем.

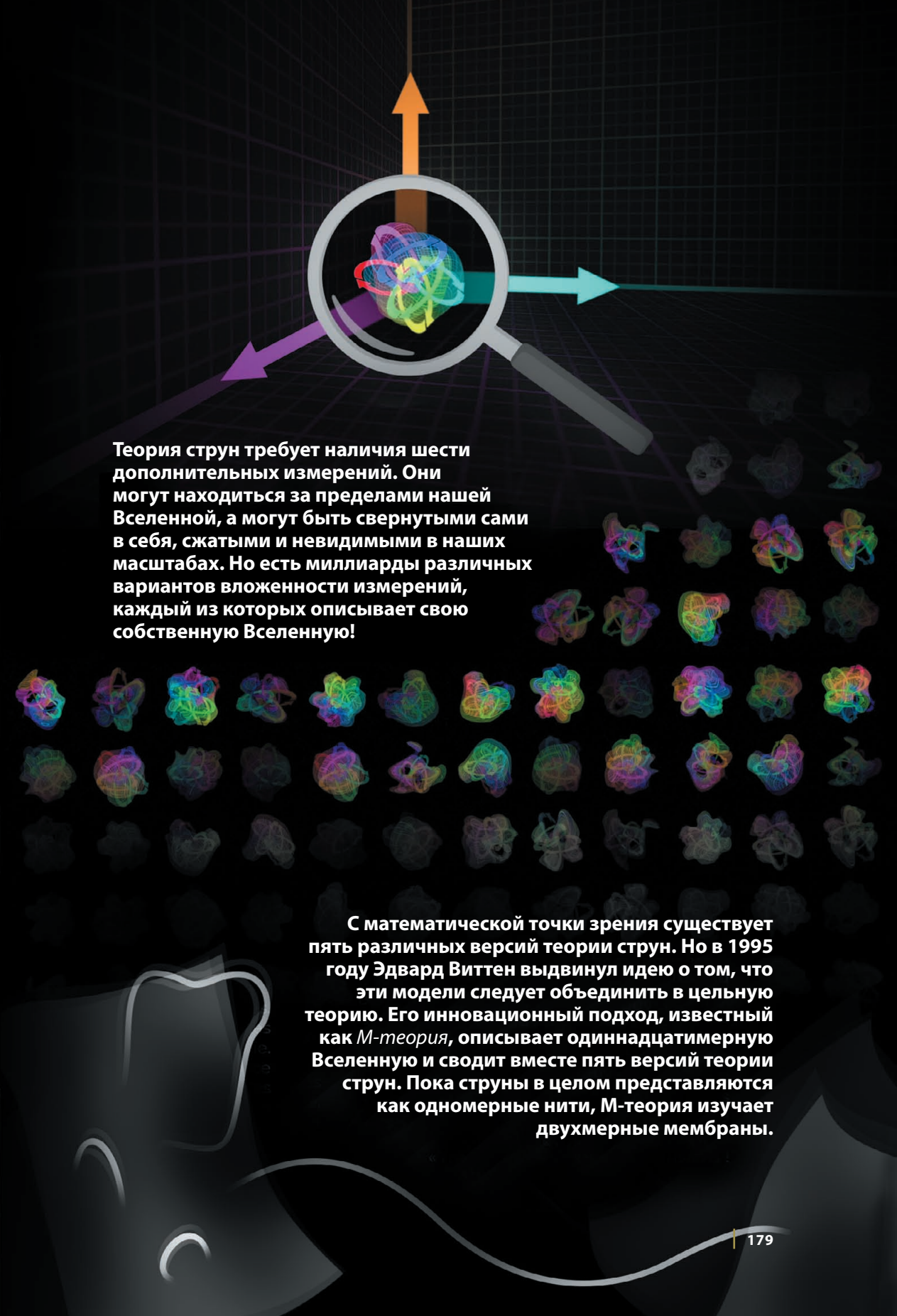


Мир струн



Струны колеблются по-разному, как крошечные резинки, что приводит к проявлению уникальных свойств каждого типа частиц.

Путешествуя в пространстве-времени, струны вырисовывают трубки и плоскости, которые могут вибрировать, объединяться или разделяться. Чтобы смоделировать квантовые взаимодействия, нам нужно наложить все возможные геометрии, все эти «плоскости Вселенной», друг на друга.



Теория струн требует наличия шести дополнительных измерений. Они могут находиться за пределами нашей Вселенной, а могут быть свернутыми сами в себя, сжатыми и невидимыми в наших масштабах. Но есть миллиарды различных вариантов вложенности измерений, каждый из которых описывает свою собственную Вселенную!


С математической точки зрения существует пять различных версий теории струн. Но в 1995 году Эдвард Виттен выдвинул идею о том, что эти модели следует объединить в цельную теорию. Его инновационный подход, известный как *М-теория*, описывает одиннадцатимерную Вселенную и сводит вместе пять версий теории струн. Пока струны в целом представляются как одномерные нити, М-теория изучает двухмерные мембраны.

Петлевая квантовая гравитация


В 1990-х годах мир увидел новый подход: петлевую квантовую гравитацию. В отличие от теории струн, в этой модели ученые пытаются описать само пространство-время как квантовый объект.

В петлевой квантовой гравитации структура Вселенной квантована: пространство-время состоит из маленьких неделимых кирпичиков или «петель», которые переплетаются и формируют ткань космоса.

Частицы пространства-времени квантуются и принимают состояние суперпозиции — расстояния и течение времени находятся в нескольких положениях одновременно.



В теории выдвигаются поразительные умозаключения применительно ко Вселенной. Например, она указывает на то, что Большой взрыв ознаменовал фазу отскока: космос сначала сжимается, а затем восстанавливается благодаря квантовым явлениям.



В этом контексте черные дыры могут содержать минимальный осадок в своем центре, так называемую планковскую звезду, стабилизированную квантовой природой самого пространства-времени.

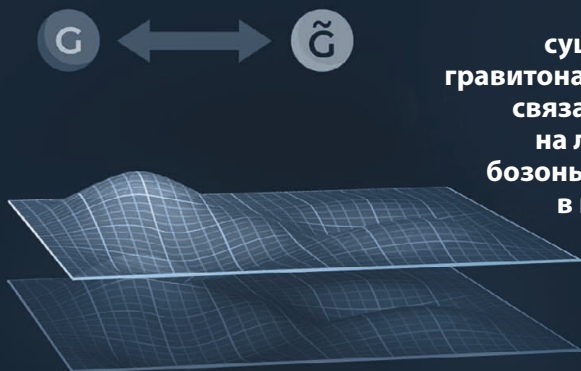
Теорию все еще трудно проверить экспериментально, и она нуждается в дальнейшем развитии. Например, мы пока не знаем, совместима ли она с общей теорией относительности. Но ее все же можно считать многообещающим способом описания гравитации в квантовом масштабе.

Другие подходы к квантовой гравитации

В настоящее время продолжается исследование целого ряда иных подходов к объединению гравитации и квантового мира. Они потенциально могут дополнить друг друга и дать ответы на самые разные вопросы.

Супергравитация

В этой модели ученые объединили общую теорию относительности и суперсимметрию, отметив существование суперпартнера гравитона — гравитино. Подход тесно связан с теорией струн и основан на локальной суперсимметрии: бозоны и фермионы симметричны в каждой точке пространства.



Голографический принцип

Анализируя голограммы (трехмерные проекции двумерного изображения), физики с 1990-х годов задавались вопросом, можно ли описать Вселенную как проекцию пространства с бóльшим количеством измерений в меньшее. Мы знаем, что таким образом можно описать черные дыры, а между квантовой теорией поля и гравитацией проявляются удивительные связи.

Причинные множества

В 1977 году Дэвид Маламент продемонстрировал, что кривизна пространства-времени обусловлена тем, как оно структурировано. Разработанная в последующие десятилетия теория причинных множеств описывает Вселенную как огромную сеть событий.

Некоммутативная геометрия

В 1980-х годах математик Ален Конн предложил новое описание Вселенной — некоммутативную геометрию. Вдохновленная квантовой физикой модель помогает нам лучше понять связь между материей и кривизной Вселенной.

$$a \times b \neq b \times a$$

Квантовая информация

Некоторые исследователи полагают, что пространство-время и гравитация могут быть построены из «кубитов», кирпичиков квантовой информации; точно так же нули и единицы составляют биты в компьютере.

Уже несколько десятилетий физики задаются вопросом, возможно ли такое объединение в принципе. Сам Хокинг, давний сторонник этой идеи, в 2000-х годах признался, что изменил свое мнение. Возможно, нашим все более совершенным моделям никогда не удастся разгадать все загадки Вселенной, ведь тайны физики вполне могут оказаться неисчерпаемыми... Но в конечном итоге будущее покажет, как в действительности обстоит дело.

Заключение



Общую теорию относительности и Стандартную модель можно с уверенностью назвать двумя самыми успешными теориями в истории физики. Ослепительные достижения последнего столетия позволили нам постичь мир так, как не удавалось никогда прежде в истории человечества: материя и частицы, эти воплощения квантовых полей с удивительными свойствами, продолжают движение по искривленной ткани пространства-времени. Новые революционные концепции провели нас дальше, чем только можно было себе вообразить, за пределы галактик и в самое сердце материи.

Чтобы исследовать невидимое, ученым пришлось положиться на свою изобретательность, и в последние десятилетия появились новые теории, которые еще шире раздвинули наши границы познания. Теперь мы можем рассказать историю Вселенной, сфотографировать черные дыры, находящиеся от нас в миллионах световых лет, изучить мельчайшие объекты в космосе и создать квантовые компьютеры.

И все же, достигнув столь высокого уровня точности, в ходе своих глубинных изысканий мы сталкиваемся с пределами наших возможностей. Новые ответы неизбежно ведут к новым вопросам. Как далеко в прошлое мы можем заглянуть? Способны ли мы погрузиться в материю бесконечно глубоко? И наконец, что бывает, когда гравитация сталкивается с квантовым миром, как происходит в центре черной дыры? Последний и самый главный вопрос по сей день остается движущей силой наиболее фундаментальных исследований. Как видите, теоретической физике еще предстоит пройти долгий путь, а область ее анализа постоянно расширяется, прокладывая новые направления на десятилетия вперед.

Благодарности



Создание этой книги обернулось серьезным испытанием, и я хотел бы с радостью поблагодарить всех, кто поддержал меня и мне помог. Без них этот проект так и не увидел бы свет.

Прежде всего я хотел бы поблагодарить Элизабет Фишер и Антуана Бошана: именно они предложили написать книгу и с самого начала доверили мне ее содержание и форму.

Большое спасибо Ирен Галлуа. Она поддерживала меня на всех этапах структурирования, написания и корректуры, а также помогала мне взглянуть на текст под другим углом, адаптироваться к письменному формату и переформулировать свои мысли так, чтобы представленные идеи были более удобоваримыми.

Поскольку мои знания ограничиваются уровнем магистра, было крайне важно, чтобы первую рукопись вычитали и проверили специалисты в каждой области. Поэтому большое спасибо Пьеру Спанью, Антуану Тиллуа и Антуану Бурже: каждый оказал мне огромную поддержку, когда прокомментировал одну из трех частей книги. Наши дискуссии были крайне полезными и помогли мне лучше разобраться в некоторых концепциях, благодаря чему весь текст стал более строгим и насыщенным информацией.

Я также хотел бы поблагодарить Марию Летицию Пьянтони, Лорана Руссея и Лилу Заки: они просмотрели первые черновики рукописи и поделились своими мнениями. Само собой, большое спасибо всем, кто

БЛАГОДАРНОСТИ

помогал в редактировании, верстке, оформлении и продвижении книги: Каролин Моро, Сесилию Ренодену и Себастьяну Йенгеру.

Наконец, я хотел бы выразить благодарность Октаву Массону и Андре-су Ф. Дюран Эрнандесу, которые уже несколько лет переводят мои видео на английский и испанский языки; Томасу Харви, который помогает мне с созданием наиболее сложных роликов на канале, и, разумеется, вам, читателям этой книги, а также всем тем, кто следит за моей работой и поддерживает меня вот уже восемь лет. Я страстно увлечен этим приключением и надеюсь, что оно еще только начинается!

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Научно-популярное издание

ПОДАРОЧНЫЕ ИЗДАНИЯ. МИССИЯ «КОСМОС»

Руссель Алессандро

**ВЕЛИКИЕ ЗАКОНЫ ВСЕЛЕННОЙ: ОТ ГРАВИТАЦИИ К КВАНТОВЫМ ЧАСТИЦАМ
ВИЗУАЛЬНЫЙ ГИД**

Главный редактор *Р. Фасхутдинов*
Начальник отдела *В. Обручев*
Руководитель группы *Ю. Лаврова*
Ответственный редактор *А. Высочкина*
Научный редактор *Г. Вакулко*
Литературный редактор *А. Сазонова*
Младший редактор *Д. Иванушкина*
Художественный редактор *Е. Пуговкина*
Компьютерная верстка *Е. Матусовской*
Корректоры *Д. Валова, С. Старчикова*

Страна происхождения: Российская Федерация
Шығарушы ел: Ресей Федерациясы

ООО «Издательство «Эксмо»
123308, Россия, г. Москва, ул. Зорге, д. 1, стр. 1, эт. 20, каб. 2013. Тел.: 8 (495) 411-68-86.
Home page: www.eksmo.ru E-mail: info@eksmo.ru
Өндіруші: «Издательство «Эксмо» ЖШҚ
123308, Ресей, Мәскеу қаласы, Зорге көшесі, 1-үй, 1-құрылыс, 20 қабат, 2013-каб.
Тел.: 8 (495) 411-68-86. Home page: www.eksmo.ru E-mail: info@eksmo.ru
Таяу белгісі: «Эксмо»

Интернет-магазин : www.book24.ru
Интернет-магазин : www.book24.kz
Интернет-дуken : www.book24.kz

Импортёр в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».
Қазақстан Республикасына импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.
Дистрибьютор и представитель по приему претензий на продукцию
в Республике Казахстан: ТОО «РДЦ-Алматы»
Дистрибьютор және Қазақстан Республикасында өнімге шағымдар
қабылдау жөніндегі өкіл: «РДЦ-Алматы» ЖШС.
Алматы қ., Домбровский көш., 3 «а», литер Б, офис 1.
Тел.: 8 (727) 251-59-90/91/92. E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz

Сведения о подтверждении соответствия издания согласно законодательству РФ
о техническом регулировании можно получить на сайте Издательства «Эксмо»:
www.eksmo.ru/certification

Техникалық реттеу туралы РФ заңнамасына сай басылымның сайкестігін растау
туралы мәліметтерді мына адрес бойынша алуға болады: <http://eksmo.ru/certification/>

Произведено в Российской Федерации
Ресей Федерациясында өндірілген
Сертификаттауға жатпайды

Дата изготовления / Подписано в печать 03.10.2024.
Формат 70х100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,56.
Тираж экз. Заказ

ISBN 978-5-04-198892-0



Литрес 
Я ТАК ЧИТАЮ

**ЧИТАЙ
ГОРОД**



eksmo.ru
Официальный
интернет-магазин
издательства «Эксмо»

БОМБОРА
издательство

БОМБОРА – лидер на рынке полезных и вдохновляющих книг.
Мы любим книги и создаем их, чтобы вы могли творить, открывать
мир, пробовать новое, расти. Быть счастливыми. Быть на волне.

 bombora.ru  [bomborabooks](https://t.me/bomborabooks)  [bombora](https://www.facebook.com/bombora)



**ТЕРИТОРИЯ
КНИЖНЫЙ МАГАЗИН**
Официальная франшиза
издательства «Эксмо»







Хочешь стать
автором «Эксмо»?



АЛЕССАНДРО РУССЕЛЬ — популяризатор науки, получивший образование в области физики и математики. Его особый талант — просто и интересно рассказывать о сложных научных теориях. Более 800 000 подписчиков его канала ScienceClic уже несколько лет подтверждают это миллионами просмотров.

КЛЮЧЕВЫЕ ТЕОРИИ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ В ПОНЯТНЫХ ИЛЛЮСТРАЦИЯХ!

-  Теория гравитации Ньютона, специальная и общая теория относительности Эйнштейна, понятие пространства-времени Минковского, гравитационные волны;
-  история Вселенной от теории Большого взрыва до черных дыр;
-  квантовая механика и стандартная модель элементарных частиц;
-  теория струн и суперсимметрия.



В беседах о космосе многие сегодня играючи упоминают такие понятия, как «Большой взрыв», «черная дыра» или «замедление времени», не задумываясь о смысловых безднах, тающихся за этими привычными сочетаниями. Раскрыть эти бездны простыми словами, не теряя при этом глубины, — большое искусство, которым блестяще владеет Алессандро Руссель.

КИРИЛЛ МАСЛЕННИКОВ,
астроном, популяризатор науки, кандидат физ.-мат. наук

ISBN 978-5-04-198892-0



9 785041 988920 >

 **БОМБОРА**
ИЗДАТЕЛЬСТВО

БОМБОРА — лидер на рынке полезных и вдохновляющих книг. Мы любим книги и создаем их, чтобы вы могли творить, открывать мир, пробовать новое, расти. Быть счастливыми. Быть на волне.