

50 ИДЕЙ,  
*о которых нужно знать*

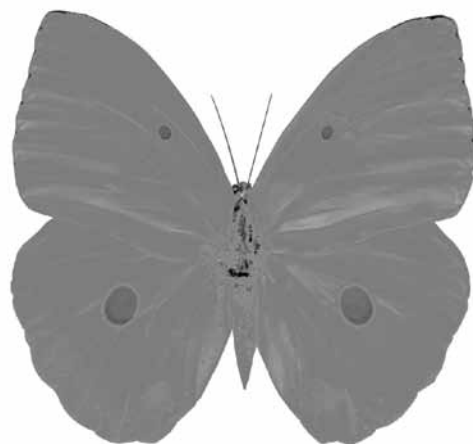
# ФИЗИКА



ДЖОАНН БЕЙКЕР

Джоанн Бейкер

# ФИЗИКА



50 ИДЕЙ,  
*о которых нужно знать*

 phantom press

# Оглавление

Вступление	3	26 Принцип неопределенности Гейзенберга	104
<b>МАТЕРИЯ В ДВИЖЕНИИ</b>		27 Копенгагенская интерпретация	108
01 Принцип Маха	4	28 Кот Шредингера	112
02 Законы движения Ньютона	8	29 Парадокс ЭПР	116
03 Законы Кеплера	12	30 Принцип исключения Паули	120
04 Закон всемирного тяготения	16	31 Сверхпроводимость	124
05 Сохранение энергии	20	<b>РАСЩЕПЛЕНИЕ АТОМА</b>	
06 Простое гармоническое движение	24	32 Атом Резерфорда	128
07 Закон Гука	28	33 Антиматерия	132
08 Закон идеального газа	32	34 Деление ядер	136
09 Второе начало термодинамики	36	35 Слияние ядер	140
10 Абсолютный ноль	40	36 Стандартная модель	144
11 Броуновское движение	44	37 Диаграммы Фейнмана	148
12 Теория хаоса	48	38 Частица Бога	152
13 Уравнение Бернулли	52	39 Теория струн	156
<b>ПОД ВОЛНАМИ</b>		<b>ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ</b>	
14 Ньютоновская теория цвета	56	40 Специальная теория относительности	160
15 Принцип Гюйгенса	60	41 Общая теория относительности	164
16 Закон Снеллиуса	64	42 Черные дыры	168
17 Закон Брэгга	68	43 Парадокс Ольберса	172
18 Дифракция Фраунгофера	72	44 Закон Хаббла	176
19 Эффект Доплера	76	45 Большой взрыв	180
20 Закон Ома	80	46 Космическая инфляция	184
21 Правило правой руки	84	47 Темная материя	188
22 Уравнения Максвелла	88	48 Космологическая постоянная	192
<b>КВАНТОВЫЕ ПАРАДОКСЫ</b>		49 Парадокс Ферми	196
23 Закон Планка	92	50 Антропный принцип	200
24 Фотоэлектрический эффект	96	Словарь терминов	204
25 Уравнение Шредингера	100	Предметный указатель	206

## Вступление

Когда я рассказывала друзьям про эту книгу, они шутили: первое, что действительно следует знать о физике, это то, что разобраться в ней трудно. Однако это не мешает нам каждый день пользоваться ею. Глядя в зеркало или надевая очки, мы используем оптику. Ставя будильник, отслеживаем время; двигаясь по карте, перемещаемся в геометрическом пространстве. Наши мобильные телефоны незримыми электромагнитными нитями привязывают нас к спутникам, вращающимся вокруг Земли. Впрочем, физика не сводится к той или иной технологии. Без нее не было бы ни луны в небе, ни радуг, ни бриллиантов. Даже кровь, текущая по нашим жилам, следует законам физики, науки о физическом мире.

Современная физика полна сюрпризов. Квантовая физика переворачивает наш мир вверх дном, ставя под сомнение само существование физических объектов. Космология задается вопросом о том, что такое вселенная. Как она возникла, почему мы оказались в ней? Является ли она неким исключением или существование ее неизбежно? Заглядывая внутрь атомов, физики обнаружили скрытый призрачный мир фундаментальных частиц. Даже крепкий стол из красного дерева состоит, по преимуществу, из пустоты, его атомы подпираются подмостками ядерных сил. Физика выросла из философии и, в определенном смысле, возвратилась к ней, дав нам возможность увидеть мир по-новому, обнаружить то, что лежит за пределами нашего повседневного опыта.

Однако физика — это не просто собрание захватывающих воображение идей. Факты и опыт — вот ее корни. Научный метод непрерывно совершенствует законы физики, с ними происходит то же, что с программным обеспечением по мере его отладки и добавления новых модулей. Если того требуют факты, происходят большие сдвиги в мышлении, однако принятие их требует времени. Для широкого признания идеи Коперника, что Земля вращается вокруг Солнца, потребовалась смена не одного поколения, однако поступь науки убыстряется — квантовая физика и теория относительности заняли свое место в ней всего за одно десятилетие. Даже самые признанные законы физики постоянно подвергаются проверке.

Эта книга предлагает вам совершить что-то вроде турне по миру физики — от таких основных концепций, как тяготение, свет и энергия, до современных идей квантовой теории, хаоса и темной энергии. Надеюсь, что она, как и всякий хороший путеводитель, породит в вас желание узнать побольше. Физика не просто фундаментальна — она *занятна*.



# 01 Принцип Маха

**Ребенка, катающегося на карусели, притягивают к себе далекие звезды. Это и есть принцип Маха, гласящий, что «масса, находящаяся там, влияет на инерцию здесь». Благодаря тяготению удаленные физические тела воздействуют на то, как движутся и вращаются близкие к нам. Но почему это так и что позволяет нам сказать, совершает что-нибудь движение или не совершает?**

Если вы когда-нибудь сидели в вагоне стоящего на станции поезда и смотрели, как мимо вас проплывают вагоны другого поезда, то знаете, что порою трудно бывает сказать, ваш поезд покидает станцию или на нее прибывает другой. Существует ли способ, который позволяет наверняка определить, какой из них действительно находится в движении?

Этот вопрос попытался решить в XIX веке австрийский философ и физик Эрнст Мах. Он пошел по стопам великого Исаака Ньютона, верившего, в отличие от Маха, что абсолютным фоном любого движения является пространство. Ньютоновское пространство было подобно миллиметровке с системой координат, и любое движение происходило словно на фоне этой решетки. Мах, однако, с этим согласен не был, он утверждал, что говорить о движении физического тела можно только в том случае, когда движение измеряется относительно другого физического тела, но не решетки. Двигаться можно лишь относительно чего-то, не так ли? В определенном смысле Мах, испытавший влияние идей ньютоновского соперника Готфрида Лейбница, был предшественником Альберта Эйнштейна, также считавшего, что говорить можно только о движении относительном. Мах полагал, что, поскольку мяч и во Франции, и в Австралии катится по земле одинаково, пространственная решетка — штука

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**335 до н.э.**

Аристотель:  
движение предметов  
совершается под  
воздействием сил

**1640 н.э.**

Галилей  
формулирует  
принцип инерции

**«Абсолютное пространство по собственной природе его и безотносительно к чему бы то ни было внешнему всегда остается однородным и неподвижным»**

**Исаак Ньютон, 1687**

бессмысленная. А единственное, что может влиять на то, как мяч катится, — это сила тяжести. На Луне мяч катился бы иначе, так как сила, притягивающая его к поверхности планеты, там меньше. А поскольку каждое существующее во вселенной тело притягивает к себе все остальные тела, каждое и ощущает присутствие всех других через их взаимное притяжение. Таким образом, движение должно в конечном счете зависеть от распределения материи или ее массы, а не от свойств пространства.

**Масса** Но что такое, если быть точным, масса? Это мера материи — ее содержание в объекте. Масса металлической лампы равна сумме масс всех атомов, из которых она состоит. Между массой и весом есть существенное различие. Вес — это мера силы тяжести, притягивающей тело к планете: на Луне космонавт весит меньше, чем на Земле, потому что там сила тяжести меньше. Однако масса космонавта остается прежней — число атомов, из которых он состоит, не изменилось. Согласно Альберту Эйнштейну, показавшему, что энергия и масса взаимозаменяемы, масса может быть превращена в чистую энергию. Стало быть, масса — это, по сути, энергия.

**Инерция** Инерция, название которой происходит от латинского слова «лень», очень схожа с массой, но она сообщает нам о том, насколько трудно сдвинуть какое-либо тело. Объект, обладающий большой инерцией, сопротивляется попыткам привести его в движение. Даже в космосе, для того чтобы сдвинуть массивное тело, необходима большая сила. Для того чтобы изменить траекторию приближающегося к Земле гигантского каменного астероида, может потребоваться мощный толчок, созданный либо ядерным взрывом, либо силой поменьше, но действующей в течение долгого времени. А для маневрирования маленького космического корабля, обладающего меньшей инерцией, довольно крошечных реактивных двигателей.

Итальянский астроном Галилео Галилей еще в XVII веке выдвинул принцип инерции: если тело оставить в покое и не прилагать к нему никаких сил, его состояние останется неизменным. Если тело движется, то оно и продолжит двигаться с той же скоростью и в том же направлении. Если покоится, то и продолжит покоиться. Ньютон усовершенствовал эту идею, обратив ее в первый из законов его имени.

**1687**

Ньютон описывает опыт с так называемым «ведром Ньютона»

**1893**

Мах публикует «Науку механики»

**1905**

Эйнштейн публикует специальную теорию относительности

**Ведро Ньютона** Ньютон же сформулировал и закон всемирного тяготения. Он понял, что массы притягивают друг друга. Яблоко падает с дерева на землю, потому что его притягивает масса Земли. Равным образом и масса яблока притягивает Землю, однако нам пришлось бы очень постараться, чтобы измерить микроскопический сдвиг всей планеты Земля в сторону яблока.

Ньютон доказал, что сила притяжения быстро уменьшается с расстоянием, и потому, если мы летим высоко над Землей, планета притягивает нас гораздо слабее, чем когда мы находимся на ее поверхности. Но и уменьшившееся притяжение Земли мы все-таки ощущаем. Чем сильнее мы от нее отдаляемся, тем слабее оно становится, однако все еще сказывается на нашем движении. На самом деле все тела вселенной хоть и слабо, но притягивают нас к себе, и их притяжение вносит тонкие изменения в наше движение.

Взаимоотношения между физическими телами и движением Ньютон попытался понять, размышляя о вращении ведра с водой. Когда ведро только начинает вращаться, вода остается неподвижной, даже несмотря на движение ведра. Затем принимается вращаться и вода. Поверхность ее искажается, в центре опускается, а по краям жидкость поднимается, пытаясь выбраться из ведра, однако ведро не выпускает ее. Ньютон утверждал, что вращение воды можно понять, лишь рассматривая его в фиксированной системе отсчета абсолютного пространства, на фоне его координатной решетки. Мы можем понять, вращается ли ведро, всего лишь взглянув на него, потому что увидим работу сил, создающих лунку на поверхности воды.

Столетия спустя Мах пересмотрел эту аргументацию. Что, если кроме ведра с водой во вселенной ничего больше нет? Как мы тогда узнаем, что вращается именно ведро? Мы ведь можем с таким же успехом сказать, что это вода вращается относительно ведра. Единственный способ понять, что происходит, состоит в том, чтобы поместить во «вселенную ведра» еще один объект — скажем, стену комнаты или даже далекую звезду. Вот тогда мы ясно увидим, что ведро вращается относительно этого объекта. А без такой системы отсчета — неподвижной комнаты или звезд — сказать, что именно вращается, ведро или вода, будет невозможно. То же самое происходит, когда мы наблюдаем за плывущим по небосводу Солнцем или за звездами. Что тут вращается — Земля или звезды? Как мы можем это узнать?

Согласно Маху и Лейбницу, для обнаружения движения необходимо внешнее по отношению к нему тело, а потому во вселенной, где есть лишь одно тело, понятие инерции бессмысленно. Так, если бы во вселенной не было ни одной звезды, мы никогда не узнали бы, что Земля вращается. Это благодаря звездам мы понимаем, что она вращается относительно них.

### Эрнст Мах, 1838–1916

Помимо формулировки принципа Маха этот австрийский физик памятен трудами по оптике и акустике, физиологии чувственного восприятия, философии науки и, в частности, исследованием, посвященным сверхзвуковой скорости. В 1877 году он опубликовал важную статью, в которой описывалось, каким образом движущийся быстрее звука реактивный снаряд порождает отстающую от него ударную волну. Именно такая волна позволяет нам слышать звуковой хлопок, создаваемый сверхзвуковым самолетом. Отношение скорости движения снаряда или реактивного самолета к скорости звука называется ныне «числом Маха». Скажем, «Мах 2» — это скорость, в два раза превышающая скорость звука.

Сформулированная принципом Маха идея относительного движения в противопоставление движению абсолютному вдохновляла многих физиков, и в особенности Эйнштейна (который, собственно, и придумал название «принцип Маха»). Эйнштейн положил мысль об относительности любого движения в основу своих теорий относительности — специальной и общей. Он также разрешил одну из знаменитых проблем, связанных с идеями Маха, — вращение и ускорение должны создавать особые силы, но где же они? Эйнштейн показал, что, если бы все во вселенной вращалось относительно Земли, мы испытывали бы воздействие малой силы, которая заставляла бы нашу планету определенным образом подрагивать.

Природа пространства оставалась для ученых загадочной на протяжении тысяч лет. Современная физика элементарных частиц позволяет считать пространство кипящим котлом, в котором эти частицы непрерывно возникают и распадаются. Масса, инерция, силы и движение — все это в конечном счете проявления булькающего квантового супа.

**В сухом остатке  
Масса определяет  
движение**

# 02 Законы движения Ньютона

**Исаак Ньютон — один из величайших, спорных и влиятельных ученых всех времен. Он участвовал в создании математического анализа, выяснил, что такое тяготение, и установил цвета, из которых состоит белый свет. Три сформулированных им закона движения объясняют, почему гольфовый мячик катится по кривой линии, почему на вираже нас вжимает в стену автомобиля и почему, ударяя бейсбольной битой по мячу, мы ощущаем отдачу.**

Хотя во времена Ньютона мотоциклов не существовало, три его закона движения объясняют, как гонщику-мотоциклисту удастся разезжать по вертикальной стене и почему на олимпийских соревнованиях велосипедисты описывают круги по наклонным трекам.

Жившего в XVII веке Ньютона считают одним из величайших мыслителей. Огромная пытливость позволила Ньютону понять некоторые из наиболее простых с виду, но чрезвычайно глубоких особенностей нашего мира: почему брошенный в воздух мяч описывает дугу, почему все тела падают вниз, а не вверх, и как планеты движутся вокруг Солнца.

Бывший в 1660-х заурядным студентом Кембриджа, Ньютон начал с чтения великих математических трудов. Они позволили ему переключиться с законов гражданского права на законы физики. А затем, во время вынужденных каникул, проведенных дома (университет закрыли из-за эпидемии чумы), Ньютон сделал первые шаги к разработке трех законов движения.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**350 до н.э.**

Аристотель предполагает в «Физике», что причина движения тел — происходящие с ними изменения

**1640 н.э.**

Галилей формулирует принцип инерции

## Ньютоновские законы движения:

*Первый закон.* Тела движутся по прямой линии с постоянной скоростью, пока на них не подействует сила, меняющая их скорость или направление движения.

*Второй закон.* Сила порождает ускорение, пропорциональное массе тела ( $F = ma$ ).

*Третий закон.* Каждое действие силы порождает равное, противоположное ему противодействие.

**Силы** Позаимствовав у Галилея принцип инерции, Ньютон сформулировал первый закон. Он утверждает, что в отсутствие силы тела не движутся или не меняют скорости своего движения. Неподвижные тела остаются в состоянии покоя, пока к ним не приложить силу; тела, которые движутся с некоей постоянной скоростью, так и будут двигаться с этой скоростью, пока на них не подействует сила. Сила создает ускорение, меняющее скорость тела. Ускорение – это изменение скорости за определенное время.

Уяснить это, основываясь только на нашем опыте, трудно. Если мы ударяем по хоккейной шайбе, она начинает скользить по льду, но в конце концов замедляется из-за трения о лед. Трение создает силу, которая замедляет движение шайбы. Однако в отсутствие трения действие первого закона Ньютона наблюдать можно. Наилучшее приближение к такой ситуации удалось бы получить в космосе, но и там работают различные силы, например гравитационная. Тем не менее первый закон дает краеугольный камень для понимания сил и движения.

**Ускорение** Второй закон Ньютона связывает величину силы с ускорением, которое она порождает. Сила, потребная для ускорения тела, пропорциональна его массе. Тяжелые тела – или, вернее, те, что обладают большой инерцией, – требуют для ускорения силы большей, чем легкие. Поэтому, чтобы за одну минуту разогнать стоящий автомобиль до скорости 100 километров в час, потребуются сила, равная массе автомобиля, умноженной на увеличение скорости за единицу времени.

**1687**

Ньютон публикует  
«Начала»

**1905**

Эйнштейн публикует  
специальную теорию  
относительности

Алгебраически второй закон Ньютона выглядит так:  $F = ma$ , т. е. сила ( $F$ ) равна массе ( $m$ ), умноженной на ускорение ( $a$ ). Если прочесть это определение справа налево, получится, что, согласно второму закону, ускорение равно силе, деленной на массу. При постоянном ускорении неизменной будет и сила на единицу массы. Стало быть, чтобы привести в движение килограмм массы, требуется одно и то же количество силы — независимо от того, составляет этот килограмм часть большого или малого тела. Это объясняет мысленный эксперимент Галилея, спросившего: если уронить с одной высоты пушечное ядро и перо, что долетит до земли первым? Пытаясь визуальнo представить себе такой опыт, мы говорим: пушечное ядро упадет на землю раньше порхающего перышка. Но это просто результат сопротивления воздуха, по которому поплывет перо. В отсутствие воздуха они будут падать с одной скоростью и ударятся о землю одновременно. Ускорение они испытывают одинаковое, создаваемое силой тяжести, а значит, и падать будут бок о бок. В 1971 году астронавты «Аполло 15» произвели такой опыт на Луне, где нет замедляющей движение атмосферы, и перо упало на поверхность Луны так же быстро, как тяжелый геологический молоток.

**Действие равно противодействию** Третий закон Ньютона гласит, что любая приложенная к телу сила порождает действующую на него равную, противоположно направленную силу. Иными словами, для каждого действия существует противодействие. Противоположная сила ощущается как отдача. Если девушка на роликовых коньках налетит на другую, она и сама откатится назад. Стрелок, производя выстрел, ощущает удар приклада в плечо. Это сила отдачи, равная по величине той, что толкает пулю. В фильмах-боевиках человек, получивший пулю, нередко отлетает назад. Это надувательство. Если бы сила удара пули и вправду была так велика, стрелок тоже отлетел бы назад из-за силы отдачи его оружия. Даже подпрыгивая на земле, мы прилагаем к нашей планете силу, толкающую ее вниз, однако Земля куда как массивнее нас, и потому результат нашего усилия остается незаметным.

С помощью трех этих законов плюс закона всемирного тяготения Ньютон сумел объяснить движение практически любых тел, от падающих желудей до вылетающих из пушечного жерла ядер. Вооруженный своими тремя уравнениями, он мог с уверенностью оседлать мощный мотоцикл и проехать по вертикальной стене — если бы такой аттракцион уже существовал в его время. Насколько сильное доверие вызывают у вас законы Ньютона? Первый из них говорит, что мотоцикл и его ездок хотят ехать в одном направлении и с определенной скоростью. Но, согласно второму закону, для того чтобы мотоцикл двигался по кругу, требуется удерживающая его сила, которая и обеспечивается непрерывным изменением направления движения, создаваемым в данном случае реакцией стены, которая передается через колеса мотоцикла. Она должна быть равной массе мотоцикла и ездока, умноженной на их ускорение. Третий закон объясняет, что давление мотоцикла на стену устанавливает



### Исаак Ньютон, 1643–1727

Исаак Ньютон стал первым в Британии ученым, удостоенным рыцарского звания. Несмотря на то что в школе его считали «ленивым» и «нерадивым», а в Кембриджском университете он ничем не блистал, Ньютон неожиданно расцвел, когда летом 1655 года университет пришлось закрыть из-за чумы. Вернувшись домой, в Линкольншир, Ньютон посвятил себя занятиям математикой, физикой и астрономией, успев также заложить основы математического анализа. Здесь были сформулированы первые варианты трех его законов движения и выведена обратная пропорциональность силы гравитации квадрату расстояния. После этого поразительного всплеска 27-летний Ньютон получил в 1669 году кембриджскую «люкасовскую» кафедру математики. Внимание его привлекла оптика, и он с помощью

призмы разложил белый свет на цвета радуги, что привело к знаменитой ссоре между ним, Робертом Гуком и Христианом Гюйгенсом. Перу Ньютона принадлежат два больших труда — «Математические начала натуральной философии», или «Начала», и «Оптика». Под конец своей карьеры Ньютон стал проявлять политическую активность. Когда король Яков II попытался вмешаться в назначения на университетские посты, Ньютон встал на защиту академической свободы, а в 1689 году стал членом парламента. Человек противоречивый, любивший, с одной стороны, всеобщее внимание, а с другой — замкнутый и нетерпимый к критике, Ньютон использовал свое сопряженное с немалой властью положение для ожесточенной борьбы с научными противниками, до самой своей смерти оставшись персоной довольно сварливой.

силу противодействия. Именно это давление и позволяет трюкачу-мотоциклисту «прилипнуть» к наклонной стене, а если мотоцикл его достаточно мощен, он может проехать и по вертикальной.

Даже сегодня законы Ньютона — это практически все, что вам следует знать, чтобы описать силы, под воздействием которых автомобиль быстро берет крутой поворот или, оборони боже, разбивается всмятку. Законы эти перестают работать для тел, движущихся со скоростью, близкой к скорости света, или обладающих очень малой массой. При этих крайних случаях бразды правления переходят в руки эйнштейновской теории относительности и квантовой механики.

## В сухом остатке Движение ухвачено



# 03 Законы Кеплера

Немецкий математик Иоганн Кеплер старался во всем отыскать повторяющиеся закономерности. Изучив астрономические таблицы, которые описывали петлеобразное движение Марса, он открыл три закона, определяющих орбиты планет. Кеплер описал движение планет по эллиптическим орбитам и объяснил, почему планеты, более удаленные от Солнца, вращаются вокруг него медленнее. Законы Кеплера преобразили астрономию и легли в основу ньютоновского закона всемирного тяготения.

**6** Меня вдруг поразила мысль, что эта маленькая горошина, красивая и голубая, и есть Земля. Я поднес к одному глазу большой палец, закрыл другой, и мой палец заслонил всю Землю. Я не ощутил себя великаном. Я почувствовал себя очень, очень маленьким

Нил Армстронг, р. 1930

Планеты вращаются вокруг Солнца, и те, что ближе к нему, движутся быстрее удаленных. Меркурий обигает Солнце всего за 80 земных дней. Если бы Юпитер двигался с той же скоростью, то совершал бы полный оборот за 3,5 земных года, тогда как у него уходит 12. Все планеты движутся также и относительно других планет, и некоторые словно движутся назад, — это потому, что Земля нагоняет их. Во времена Кеплера такие «ретроградные» движения были для астрономов большой загадкой. Именно ее разрешение и позволило Кеплеру разработать три закона движения планет.

**Структура многогранников** Немецкий математик Иоганн Кеплер старался найти в природе повторяющиеся закономерности. Он жил на рубеже XVI и XVII веков, когда к астрологии относились очень серьезно, а астрономия пребывала в состоянии младенчества. Религиозные идеи представлялись такими же важными для выявления законов

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**580** до н.э.

Пифагор утверждает, что планеты движутся по поверхности хрустальных сфер

**150** н.э.

Птолемей обнаруживает ретроградное движение планет и предполагает, что планеты движутся по эпициклам

### Иоганн Кеплер, 1571–1630

Астрономию Иоганн Кеплер любил с детства — записи о кометах и лунных затмениях появились в его дневнике, когда ему не было еще и десяти лет. Учительствуя в Граце, Кеплер разработал космологическую теорию, которую и опубликовал в труде «*Mysterium Cosmographicum*» («Тайна мира»). Впоследствии он помогал астроному Тихо Браге в его обсерватории под Прагой, а в 1601 году унаследовал от него должность Императорского математика. Кеплер составлял гороскопы

для императора и, анализируя астрономические таблицы Тихо, опубликовал свои теории некруговых орбит, а также первый и второй законы планетарного движения («*Astronomia Nova*» — «Новая астрономия»). В 1620-м мать Кеплера, занимавшуюся траволечением, посадили в тюрьму как ведьму, и лишь благодаря усилиям Кеплера ей удалось вернуть свободу. Однако он продолжал работу и опубликовал свой третий закон планетарного движения в книге «*Harmonices Mundi*» («Гармония мира»).

природы, как и наблюдения. Будучи мистиком, верившим, что основная структура вселенной построена на совершенных геометрических фигурах, Кеплер старался обнаружить в природе закономерности, связанные с правильными многогранниками.

Кеплер трудился через сто лет после того, как польский астроном Николай Коперник высказал предположение, что Солнце находится в центре вселенной, Земля же вращается вокруг него, а не наоборот. Со времен же древнегреческого философа Птолемея считалось, что Солнце и звезды вращаются вокруг Земли, двигаясь по поверхности твердых хрустальных сфер. Коперник не решился опубликовать свои радикальные идеи, пока был жив, и лишь перед самой смертью попросил коллегу сделать это. Предположение Коперника, что Земля не центр вселенной, — а из этого следовало, что и люди не самые главные в ней существа, опекаемые антропоцентрическим Богом, — взволновало многие умы.

Кеплер принял гелиоцентрическую концепцию Коперника, но сохранил веру в то, что планеты движутся вокруг Солнца по круговым орбитам. Он думал о системе, в которой орбиты планет лежат внутри вереницы вложенных одна в другую сфер, расстояния между которыми определяются математическими соотношениями, выведенными из размеров вписанных в эти сферы трехмерных геометрических фигур. Воображению его рисовались вписанные в сферы многогранники со все возрастающим числом

**1543**

Коперник предполагает, что планеты вращаются вокруг Солнца

**1576**

Тихо Браге составляет схему положений планет

**1609**

Кеплер показывает, что планеты движутся по эллиптическим орбитам

**1687**

Ньютон объясняет законы Кеплера с помощью закона всемирного тяготения

**Мы — всего лишь передовое племя обезьян, обитающее на малой планете очень заурядной звезды. Но мы обладаем способностью понимать вселенную. И это делает нас существами совершенно особыми**

**Стивен Хокинг, 1989**

поведение планет не могла, и потому астрономы добавили к орбитам планет «эпициклы», или дополнительные петли. Но и эпициклы помогали плохо. Солнце-центричная модель вселенной Коперника требовала меньше эпициклов, чем земле-центричная, однако и она тонких деталей не описывала.

Пытаясь смоделировать орбиты планет так, чтобы они подтвердили его геометрические идеи, Кеплер использовал сложные таблицы движения планет, составленные

## Законы Кеплера:

*Первый закон.* Орбита планеты представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце.

*Второй закон.* За равные промежутки времени линия, соединяющая планету с Солнцем, описывает равные площади.

*Третий закон.* Периоды обращения соотносятся с размерами эллипсов так, что квадрат периода пропорционален кубу полуоси орбиты.

граней. Основная идея состояла в том, что законы природы следуют основным геометрическим соотношениям, выведенным древними греками.

Слово «планета» происходит от греческого «блуждающая». Поскольку планеты нашей Солнечной системы находятся к Земле намного ближе, чем далекие звезды, они выглядят блуждающими по небу. Ночь за ночью планеты пролагают себе путь среди звезд. Однако время от времени путь каждой обращается вспять — планета описывает небольшую петлю. Такие ретроградные движения считались дурными знаменами. Птолемеева модель планетарного движения понять такое

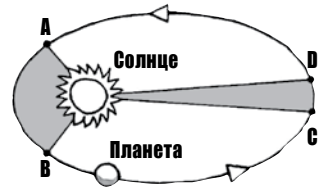
Тихо Браге. И обнаружил в этих колонках цифр повторяющиеся закономерности, которые навели его на мысль о трех сформулированных им впоследствии законах.

Первый революционный прорыв Кеплера состоял в том, что он разобрался в ретроградном движении Марса. Кеплер понял, что попятные петли можно объяснить, если планеты вращаются вокруг Солнца по орбитам эллиптическим, а не круговым. Ирония состояла еще и в том, что из того вытекало: природа не следует совершенным геометрическим формам.

**Орбиты** Первый закон Кеплера гласит, что орбита планеты представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Второй закон Кеплера описывает скорость движения планет по их орбитам. Планета

за равные промежутки времени покрывает сегменты равной площади. Сегмент измеряется углом между Солнцем и двумя положениями планеты на ее орбите (AB или CD) и сильно смахивает на ломоть круглого пирога. Поскольку орбиты эллиптические, близким к Солнцу надо проходить большее расстояние, чтобы покрыть такую же площадь, какую покрывает за то же время более удаленная планета. Поэтому чем ближе планета к Солнцу, тем быстрее она вынуждена двигаться. Второй закон Кеплера связывает расстояние, которое отделяет планету от Солнца, со скоростью ее движения. Сила притяжения Солнца придает более близкой к нему планете большее ускорение, хотя Кеплер знать этого, разумеется, не мог.



Третий закон Кеплера является еще одним шагом вперед, устанавливая связь между периодом обращения планеты по эллипсу с расстоянием, отделяющим ее от Солнца. Согласно этому закону, квадраты периодов обращения пропорциональны кубу длинной оси их орбит. Чем длиннее эллиптическая орбита, тем больше период обращения по ней. Планете, которая находилась бы от Солнца вдвое дальше, чем Земля, потребовалось бы восемь наших лет, чтобы обогнуть его. Итак, далекие от Солнца планеты движутся медленнее, чем близкие к нему. Марс обходит Солнце почти за два земных года, Сатурн — за 29, а Нептун — за 165.

Сформулировав три своих закона, Кеплер сумел описать орбиты всех планет нашей Солнечной системы. В той же мере его законы приложимы и к любому телу, вращающемуся вокруг какого-то другого, — от комет, астероидов и спутников планет Солнечной системы до планет, которые обращаются вокруг других звезд, и даже искусственных спутников Земли. Кеплеру удалось соединить эти принципы в геометрические законы, однако на чем эти законы держатся, он не знал. Кеплер верил, что основу их составляют присущие природе фундаментальные геометрические закономерности. Понадобился Ньютон, чтобы объединить его законы в теории всемирного тяготения.

**«Прежде я измерял небеса,  
Теперь измеряю тени,  
В небо ушел мой разум,  
Тело лежит в земле»**

**Эпитафия Кеплера, 1630**

**В сухом остатке  
Закон мироздания**

# 04 Закон всемирного тяготения

Исаак Ньютон, связавший движение пушечных ядер и падающих с деревьев плодов с движением планет и соединивший тем самым небо с Землей, сделал колоссальный шаг вперед. Его закон всемирного тяготения остается одной из самых мощных физических идей, объясняющей многое в физическом поведении нашего мира. Ньютон утверждал, что все тела притягивают друг друга и что сила этого притяжения спадает пропорционально квадрату расстояния между ними.

Идея притяжения посетила Исаака Ньютона, когда он увидел упавшее с дерева яблоко. Правда это или нет, неизвестно, но можно сказать, что для создания закона всемирного тяготения Ньютону пришлось объять воображением Землю и небо.

**Притяжение — это привычка, от которой трудно избавиться**

Терри Пратчетт, 1992

Ньютон понял, что предметы притягиваются к Земле некоей ускоряющей их движение силой (см. с. 9).

Ну хорошо, яблоки падают с деревьев, но что, если это дерево дорастет до Луны? Сама-то Луна почему не падает, точно яблоко, на Землю?

**Так она же и падает** Ответом Ньютона были поначалу его законы движения, связующие силы, массу и ускорение. Вылетевшее из пушки ядро пролетает, прежде чем упасть на землю, некоторое расстояние. А если выстрел будет помощнее? Тогда ядро улетит дальше. А если выстрелить так, чтобы ядро пролетело по прямой линии расстояние настолько большое, что Земля под ним начнет сильно скругляться, где оно упадет? Ньютон сообразил, что тогда ядро выйдет

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

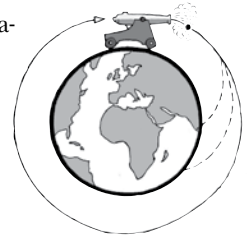
350 до н. э.

Аристотель обсуждает падение тел

1609

Кеплер устанавливает законы планетарных орбит

на круговую орбиту. Станет спутником, который все время притягивается к Земле, но никогда на нее не падает.



Когда метатель молота раскручивается на пятках, молот вращается вследствие натяжения струны. Без этой тяги он улетел бы по прямой линии, — что молот и делает, когда его отпускают. То же происходит с ньютоновским ядром — без направленной к центру Земли силы, которая притягивает его к Земле, он улетел бы в космос. А поразмыслив еще, Ньютон пришел к выводу, что и Луна висит в небе потому, что ее удерживает незримая нить притяжения. Без этой нити улетела бы в космос и она.

**Закон обратных квадратов** Ньютон попытался записать свои предсказания в количественной форме. Обменявшись письмами с Робертом Гуком, Ньютон показал, что сила притяжения подчиняется закону обратных квадратов — она уменьшается, как квадрат расстояния от тела. Если вы находитесь на каком-то расстоянии от тела, а затем удалитесь от него на вдвое большее, то тело будет притягивать вас в четыре раза слабее. Солнце притягивает планету, которая находится вдвое дальше, чем Земля, с силой в четыре раза меньшей, чем Землю; если расстояние втрое больше, сила будет в девять раз слабее.

Обратная пропорциональность силы притяжения квадрату расстояния объединяет в одном уравнении орбиты всех планет, описанные тремя законами Кеплера (см. с. 12). Закон Ньютона предсказывает, что чем ближе эллиптическая орбита планеты к Солнцу, тем быстрее планета будет двигаться. Чем ближе планета к Солнцу, тем сильнее она притягивается Солнцем, что заставляет ее ускоряться. Когда скорость возрастает, планета по орбите отрывается от Солнца и скорость ее медленно спадает. Таким образом, Ньютон соединил все более ранние работы в одной глубокой теории.

**«Каждое тело притягивается каждым другим телом вдоль соединяющей их центры линии с силой, пропорциональной массе каждого из тел и обратно пропорциональной расстоянию между ними»**

Исаак Ньютон, 1687

**Вселенский закон** Затем Ньютон делает смелое обобщение, заявляя, что его теория тяготения распространяется на все, что есть во вселенной. Любое тело создает силу притяжения, пропорциональную его массе, и эта сила спадает обратно пропорционально квадрату расстояния от тела. Любые два тела притягивают друг друга, но, поскольку сила притяжения мала, наблюдать ее удастся лишь в случае очень массивных тел, таких как Солнце, Земля и планеты.

1640

Галилей устанавливает принцип инерции

1687

Ньютон публикует «Начала»

1905

Специальная теория относительности Эйнштейна

1915

Общая теория относительности Эйнштейна



На поверхности Земли ускорение, создаваемое силой ее притяжения,  $g$ , составляет 9,8 метра на секунду в квадрате.

Впрочем, крошечные вариации в силе тяжести можно заметить и на поверхности Земли. Массивные горы и горные породы различной плотности увеличивают или уменьшают силу притяжения, и в непосредственной близости от них возникает возможность использовать гравиметр для создания карты географических рельефов и для изучения структуры земной коры. Археологи также порой используют мельчайшие отклонения силы тяжести для отыскания скрытых под землей древних поселений. Не так давно ученые с помощью космических спутников смогли зарегистрировать уменьшение количества льда в полярных областях Земли, а также изменения в земной коре, происходившие после сильных землетрясений.

Под конец XVII столетия Ньютон изложил все свои касающиеся тяготения идеи в книге «*Philosophiæ naturalis principia mathematica*» («Математические начала натуральной философии»), известной просто как «*Principia*» («Начала»). Опубликованная в 1687 году «*Principia*» и поныне почитается как краеугольный камень науки. Всемирное тяготение Ньютона определяет движение не только планет и их лун, но и снарядов, маятников и падающих яблок. Ньютон объяснил орбиты комет, формирование приливов и колебаний земной оси. Эта работа закрепила за Ньютоном репутацию одного из величайших мыслителей всех времен.

## Открытие Нептуна

Планету Нептун открыли благодаря ньютоновскому закону тяготения. В начале XIX века астрономы заметили, что Уран не просто следует по своей орбите, но ведет себя так, точно она испытывает возмущения со стороны какого-то другого тела. На основе закона Ньютона были сделаны различные предсказания, и в 1846 году планета Нептун, названная так в честь морского божества, была обнаружена очень близко от того места, в котором ее ожидали увидеть. Британские и французские

астрономы не пришли к согласию относительно того, кто сделал это открытие, приписываемое и Джону Куху Адамсу, и Урбену Леверье. Нептун обладает массой, в 17 раз превосходящей массу Земли, и является «газовым гигантом» с толстой и плотной атмосферой, состоящей из водорода, гелия, аммиака и метана, окружающей еще более плотное ядро. Облака на Нептуне синеватые — из-за метана. На нем дуют самые сильные в Солнечной системе ветра — до 2500 километров в час.

## Приливы

В своих «Началах» Ньютон описал и формирование на Земле океанских приливов. Они возникают оттого, что Луна с разной силой притягивает воду, находящуюся на ближней и дальней сторонах Земли, между тем как сама Земля притягивает воду одинаково. Различие в гравитационном притяжении на разных сторонах Земли заставляет воду вздуться в направлении Луны и отступать от нее, отчего каждые 12 часов и возникают приливы и отливы. Хотя более массивное Солнце и притягивает Землю с большей, нежели маленькая Луна силой, последняя создает более

сильный приливный эффект, поскольку находится ближе к Земле. Закон обратной пропорциональности квадрату расстояния означает, что близкая Луна создает гораздо больший, чем далекое Солнце, гравитационный градиент (разница между ближней и дальней сторонами Земли). Во время полнолуния или когда Луна совсем молода, Земля, Солнце и Луна выстраиваются на одной линии и возникают особенно высокие приливы, именуемые «сизигийными». Когда же эти тела образуют угол в  $90^\circ$ , возникают самые слабые приливы, «квадратурные».

Открытый Ньютоном закон всемирного тяготения выдержал проверку двумя столетиями, и даже сейчас это основной инструмент для описания движения тел. Однако наука не стоит на месте, и ученые продолжили возводить ее здание на заложенной Ньютоном основе, — в особенности это относится к Эйнштейну с его общей теорией относительности. Ньютоновское тяготение все еще хорошо работает для большинства видимых нами объектов, описывая поведение планет, комет и астероидов Солнечной системы на больших расстояниях от Солнца. Хотя закон тяготения позволил предсказать положение планеты Нептун, открытой в 1846 году, орбита другой планеты, Меркурия, потребовала физики, отличной от ньютоновской. Для объяснения ситуаций, возникающих там, где сила притяжения очень сильна, — вблизи Солнца, звезд и черных дыр — требуется общая теория относительности.

**«Кто-то сказал, что спорить с глобализацией — это примерно то же, что спорить с законом тяготения»**

**Кофи Аннан, р. 1938**

**В сухом остатке**  
**Масса притягательна**



# 05 Сохранение энергии

**Энергия — это живительная сила, которая заставляет все, что существует в мире, двигаться или изменяться. Она имеет множество обликов и может проявляться как изменение скорости тела, как распространение электромагнитных волн или как порождающие тепло колебания атомов. И хотя энергия способна преобразовываться из одного типа в другой, общее ее количество всегда остается неизменным. Ее невозможно ни создать, ни уничтожить.**

Все мы знакомы с энергией как с основным движущим началом. Уставая, мы теряем энергию, прыгая от радости, демонстрируем ее наличие. Но что она собой представляет? Энергия, на которой работают наши тела, имеет своим источником сжигаемые нами химические вещества — одни молекулы преобразуются в другие, высвобождая при этом энергию. Однако какие типы энергии позволяют лыжнику набирать, спускаясь по склону, скорость, а электрической лампочке светиться? И вправду ли они ничем один от другого не отличаются?

Энергия принимает столько обликов, что определить ее сущность трудно. Даже сейчас физики не могут сказать, что она собой представляет, хотя очень хорошо понимают, что она делает и как с ней обращаться. Энергия есть свойство материи и пространства, своего рода топливо или скрытый движитель, обладающий способностью создавать, приводить в движение либо изменять. Натурфилософы, начиная с древнегреческих, имели расплывчатое представление об энергии как о силе или субстанции, которая дает жизнь всему, что существует в мире, и это описание пристало к ней на века.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**600 до н. э.**

Фалес Милетский осознает, что форма вещества изменчива

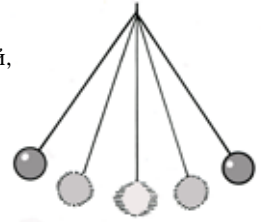
**1638**

Галилей отмечает в движении маятника преобразование потенциальной энергии в кинетическую

**1676**

Лейбниц формулирует преобразование энергии математически и дает этому процессу название «*vis viva*»

**Переход энергии из одной формы в другую** Галилей, наблюдая за колебаниями маятника, первым обнаружил, что энергия способна преобразовываться из одной ее формы в другую. Он обнаружил, что диск маятника обменивает высоту на скорость, и наоборот: скорость возносит его вверх, затем он падает и цикл движения повторяется. В верхней точке своего движения диск никакой скоростью не обладает, а проходя нижнюю, обладает наибольшей.



Галилей рассудил, что существуют две формы энергии и во время колебаний маятника одна форма переходит в другую и наоборот. Одна — это гравитационная потенциальная энергия, способная поднимать физическое тело над поверхностью Земли, преодолевая ее притяжение. Гравитационная энергия должна добавляться массе, чтобы та смогла подняться повыше, и высвободиться, когда масса падает. Если вам приходилось забираться на велосипеде по крутому склону холма, вы знаете, что для преодоления притяжения Земли требуется немалая энергия. Другая форма энергии, присущая маятнику, — кинетическая, связанная со скоростью. Таким образом, маятник использует переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно. В точности то же делает хитроумный велосипедист. Спускаясь по крутому склону, он может набрать скорость и долететь до конца спуска, даже не крутя педали, а затем использовать набранную скорость для того, чтобы взлететь на какое-то расстояние вверх по склону следующего холма.

Подобным же образом простой переход потенциальной энергии в кинетическую может использоваться для того, чтобы снабжать энергией наши дома. В гидроэлектростанциях и приливных плотинах вода, падающая с высоты, вращает турбины, а те вырабатывают электричество.

## Формулы энергии

Гравитационная потенциальная энергия  $E_p$  алгебраически изображается так:  $E_p = mgh$ , или масса  $m$ , умноженная на ускорение свободного падения  $g$  и высоту  $h$ . Это эквивалентно силе ( $F = ma$  из второго закона Ньютона), умноженной на высоту. Таким образом, сила передает энергию.

Кинетическая энергия  $E_k$  описывается как  $E_k = \frac{1}{2} mv^2$  — количество энергии определяется квадратом скорости  $v$ . Она может быть представлена и как совершенная усредненной силой работа, умноженная на пройденное расстояние.

**1807**

Юнг вводит термин «энергия»

**1905**

Эйнштейн показывает эквивалентность массы и энергии

**Многоликость энергии** Энергия проявляет себя в виде различных типов, и в каждом из них она может временно сохраняться различными способами. Сжатая пружина сохраняет энергию упругости, которая может затем высвободиться по нашему желанию. Тепловая энергия увеличивает колебания атомов и молекул в веществе. Так, сковорода нагревается на плите, потому что ее атомы, получая приток энергии, начинают колебаться быстрее. Энергия может также переноситься в виде электромагнитных волн — свет, радиоволны, — а химическая энергия — высвободиться в ходе химических реакций, что и происходит в пищеварительной системе каждого из нас.

Эйнштейн обнаружил, что масса тесно связана с энергией, которая выделяется при уничтожении массы. Таким образом, масса и энергия эквивалентны. Об этом и говорит его прославленное уравнение  $E = mc^2$ , т. е. энергия  $E$ , высвобождаемая при уничтожении массы  $m$ , равна массе  $m$ , умноженной на квадрат скорости света  $c$ . Эта энергия высвободается и при ядерном взрыве, и в питающих Солнце реакциях синтеза (см. с. 136–143). Поскольку коэффициентом в этой формуле является квадрат скорости света, а он очень велик (в пустоте свет проходит 300 миллионов метров в секунду), количество энергии, что высвободается даже при уничтожении нескольких атомов, огромно.

Мы потребляем энергию в наших домах, питаем ею промышленность. Мы говорим о генерировании энергии, но на самом деле речь идет о ее преобразовании из одного типа в другой. Мы извлекаем химическую энергию из угля и природного газа и преобразуем ее в тепло, которое в конечном счете вращает турбины и создает электричество. Сама же химическая энергия, скрытая в угле и газе, получена ими от Солнца, и потому солнечная энергия есть корень всего, что работает на Земле. И хоть нас тревожит ограниченность земных запасов энергии, однако того ее количества, какое можно получить от Солнца, более чем достаточно для обеспечения всех наших нужд — следует лишь ухитриться прибрать ее к рукам.

**Сохранение энергии** Сохранение энергии — это прежде всего закон физики, а уж потом призыв экономить энергию. Закон этот утверждает, что полное количество энергии неизменно, даже когда она перераспределяется между различными типами. Представление об этом появилось лишь относительно недавно, после изучения многих типов энергии. В начале XIX столетия Томас Юнг ввел слово «энергия», до того эта сила именовалась *vis viva* («живая сила») — так ее назвал Готфрид Лейбниц, разработавший математический аппарат для описания движения маятника.

Было замечено, что кинетическая энергия сама по себе не сохраняется. Ядра или маховые колеса замедлялись и потому вечно двигаться не могли. К тому же быстрое движение приводило к разогреву механизмов вследствие трения — например, при высверливании пушечных дул, — и потому экспериментаторы пришли к выводу, что

высвобождаемая энергия частично обращается в тепловую. Постепенно, учитывая все типы энергии, которые использовались при создании механизмов, ученые смогли показать, как энергия переходит из одного ее типа в другой, не уничтожаясь и не возникая.

**Количество движения** Идея сохранения не ограничивается в физике одной лишь энергией. С ней тесно связаны две другие концепции — сохранения количества движения (импульса) и сохранения момента количества движения. Импульс тела определяется как произведение его массы на скорость и описывает трудность его замедления или отклонения от прямого пути. Быстро движущееся тяжелое тело обладает большим импульсом, отчего остановить или отклонить его трудно. Поэтому грузовик, идущий со скоростью 60 километров в час, обладает импульсом более солидным, чем едущая с той же скоростью легковушка, и, столкнувшись с грузовиком, повреждений вы тоже получите больше. Импульс связан не только с размером тела, но и с направлением движения. Сталкивающиеся тела обмениваются импульсами так, что сумма их сохраняется — в смысле и количества, и направления. Если вы когда-нибудь играли в бильярд, то пользовались как раз этим законом. При столкновении двух шаров происходит и перенос количества движения от одного к другому, и его сохранение. Поэтому, если вы попадаете катящимся шаром в покоящийся, конечные пути обоих будут представлять собой комбинацию скорости и направления движения первого из них. И скорость, и направление движения каждого можно рассчитать исходя из того, что импульс сохраняется во всех направлениях.

Аналогичным образом работает сохранение момента импульса. Для тела, вращающегося вокруг какой-либо точки, момент импульса — это произведение импульса тела на расстояние от тела до центра вращения. Сохранение момента импульса используется, к примеру, при вращении фигуристов. Если фигурист вытягивает руку или ногу, вращение его замедляется, но стоит ему притиснуть конечности к телу, как вращение убыстряется. Происходит это потому, что тело меньшего размера требует для сохранения момента импульса большей скорости вращения. Попробуйте проделать это, сидя в офисном кресле, сами увидите.

Сохранение энергии и сохранение количества движения и поныне остаются фундаментальными принципами физики. Место для этих концепций нашлось и в современных областях — в общей теории относительности и в квантовой механике.

**В сухом остатке**  
Энергия неуничтожима

# 06 Простое гармоническое движение

Для многих колебаний характерно простое гармоническое движение, как у маятника. Родственное вращательному движению, оно наблюдается в колеблющихся атомах, электрических цепях, морских волнах, волнах света и даже в подрагивании мостов. И хотя простое гармоническое движение является предсказуемым и устойчивым, приложение даже небольших дополнительных сил может нарушить его устойчивость и привести к катастрофе.

Колебания – вещь чрезвычайно распространенная. Каждому из нас доводилось, резко опустившись на кровать или в кресло, некоторое время покачиваться на их пружинах, каждому случалось дергать гитарную струну, ловить раскачивающийся шнур электрического выключателя, слышать, как фонит электронный динамик. Все это различные виды колебаний.

Простое гармоническое движение описывает, как на выведенное из состояния равновесия физическое тело воздействует корректирующая сила, пытающаяся это равновесие восстановить. Пролетая мимо своего начального положения, тело колеблется туда-сюда, пока не возвращается в него окончательно. Создающая простое гармоническое движение корректирующая сила всегда направлена противоположно направлению движения и пропорциональна расстоянию, на которое оно удаляется от начальной точки. Чем дальше уходит от нее тело, тем большей становится сила, которая тянет его назад. Проскакивая в возвратном движении начальную точку, оно летит

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ****1640**

Галилей конструирует маятниковые часы

**1851**

Маятник Фуко демонстрирует вращение Земли

в другую сторону и, точно ребенок на качелях, снова начинает испытывать воздействие тянущей его к ней силы, которая в конце концов останавливает его и посылает назад. Так оно туда-сюда и колеблется.

**Маятники** Еще один способ описания простого гармонического движения состоит в том, чтобы рассматривать его как вращательное движение, спроецированное на прямую линию, например, такую, по какой движется по земле тень сиденья раскачивающихся детских качелей. Подобно грузу маятника, эта тень движется вперед-назад, замедляясь у конечных точек и набирая скорость в середине цикла. В обоих случаях груз или сиденье обменивают гравитационную потенциальную энергию, или высоту, на энергию кинетическую, или скорость.



Качающийся маятник совершает простое гармоническое движение. Его отклонение от начальной центральной точки описывает во времени синусоидальную волну. Маятник предпочел бы висеть вертикально, сохраняя состояние покоя, но, после того как его толкают в одну сторону, сила тяготения начинает тянуть маятник к центру, сообщает дополнительную скорость и колебания становятся устойчивыми.

**Вращение Земли** Маятники чувствительны к вращению Земли. Оно приводит к тому, что плоскость качаний маятника медленно поворачивается. Если представить себе маятник, подвешенный над Северным полюсом, то плоскость его качаний будет фиксирована относительно звезд, а земной наблюдатель увидит, что за сутки она поворачивается на  $360^\circ$ . Для маятника, подвешенного над экватором, такого вращения не будет — он станет вращаться вместе с Землей, и плоскость его качаний останется неподвижной. Для любой другой широты эффект лежит где-то между этими двумя. Таким образом, факт вращения Земли можно доказать, просто наблюдая за маятником.

Французский физик Леон Фуко прославился тем, что продемонстрировал этот эффект широкой публике, подвесив 70-метровый маятник к потолку парижского Пантеона. Ныне гигантские маятники Фуко имеются во многих музеях мира. Правда, необходимо, чтобы плоскость качания была устойчивой, а сам маятник не покручивался. Традиционный способ добиться этого состоит в том, чтобы оттянуть маятник за привязанную к его диску веревку, а затем поджечь ее свечой, чтобы она плавно отпустила маятник. Для того чтобы гигантские маятники качались в течение долгого времени, не замедляясь из-за сопротивления воздуха, их нередко подталкивают с помощью специальных моторчиков.

**1940**

Разрушается  
Такомский мост

**2000**

В Лондоне приходится  
закрыть из-за резонанса Мост  
Тысячелетия («Шаткий мост»)

**Хронометрия** Несмотря на то что маятник известен с X столетия, широкое использование его в часах началось только в XVII веке. Длительность полного цикла качания маятника зависит от длины его подвески. Чем она короче, тем быстрее

**Если к маятнику (Биг-Бена) прилепить старый английский пенни, длительность его качания увеличится суммарно на две пятых секунды в день. В том, какое воздействие окажет на него евро, мы пока не разобрались**

**«Твейтс энд Рид», 2001**  
(Компания, занимающаяся техническим обслуживанием Биг-Бена)

качается маятник. Чтобы повысить точность хода лондонского Биг-Бена, к его тяжелому грузу прилепляют монеты — старые пенни. Монеты смещают центр тяжести маятника, это и проще, чем сдвигать вверх или вниз весь его тяжелый диск, и точность дает куда большую.

Простое гармоническое движение не ограничивается маятником, в природе оно встречается повсеместно. Оно присутствует повсюду, где происходят свободные колебания, — от колебательных токов электрических схем до движения частиц в морских волнах и даже движения атомов в ранней вселенной.

**Резонанс** Более сложные колебания можно описывать, взяв за основу простое гармоническое движение и внося в него дополнительные силы.

Колебания можно усиливать, добавляя к ним энергию внешнего движителя, а можно ослаблять, отбирая у них некоторое количество энергии. Например, можно заставить

## Хорошие вибрации

Электронные схемы могут вибрировать, когда токи протекают в них то в одну, то в другую сторону, совершая подобие маятникового движения. Такие схемы способны производить электронные звуки. Одним из самых ранних электронных инструментов является «терменвокс». Он создает призрачные возвышающиеся и спадающие ноты и был использован группой «Бич Бойз» в ее песне «Хорошие вибрации». «Терменвокс» состоит из двух электронных антенн, а играют на нем, даже не прикасаясь к инструменту, но вода вблизи него руками. Одна рука музыканта управляет высотой тона, другая — громкостью, и каждая исполняет роль части электронной схемы. Название «терменвокс» получил в честь его изобретателя, физика Льва Термена, который в 1919 году разрабатывал по заданию правительства России датчики движения. В 1920-м он продемонстрировал свой инструмент Ленину, а в 1920-х познакомил с ним Соединенные Штаты. Коммерческим производством «терменвоксов» занимался Роберт Муг, который затем изобрел электронный синтезатор, произведший революцию в поп-музыке.



струну виолончели колебаться в течение долгого времени, регулярно пощипывая ее. А можно приглушить звонкую фортепьянную струну, придавив ее обитым войлоком молоточком и отняв у нее часть энергии. Такие движущие силы, как прикосновения смычка к струнам, могут прилагаться через равные промежутки времени, а могут и неритмично. Если они не синхронизированы, колебательная система способна очень быстро начать вести себя на удивление странно.

Такое резкое изменение поведения стало роковым для одного из самых длинных в Соединенных Штатах моста — Такомского, штат Вашингтон. Этот подвесной мост через пролив Такома-Нэрроуз ведет себя, как толстая гитарная струна: он легко начинает вибрировать на определенных частотах, которые определяются его длиной и шириной. Подобно струне музыкального инструмента, он входит в резонанс со своим фундаментальным тоном, но также и реверберирует, создавая обертона (множественные) этой основной ноты. Инженеры стараются проектировать мосты так, чтобы их фундаментальные тона сильно отличались от частот, создаваемых естественными явлениями — вибрациями, возникающими при сильном ветре, движении автомобилей или воды. Однако к тому роковому дню инженеры в достаточной мере не подготовились.

Такомский мост (известный в тех краях как «Галопирующая Герти») имеет милю в длину и построен из прочной стали и бетона. Но вот в один ноябрьский день 1940 года ветер усилился настолько, что стал создавать крутильные колебания на резонансной частоте моста. Мост страшно затрясся и в конце концов развалился и рухнул. По счастью, обошлось без жертв, если не считать впавшую в ужас собаку, которая укусила человека, пытавшегося вытащить ее из машины, пока та не полетела в воду. Мост отремонтировали, теперь он не скручивается, но и в наше время мосты могут впадать в резонанс при возникновении неких непредвиденных сил.

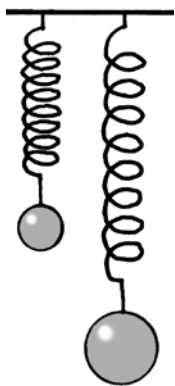
Колебания, которые усиливаются притоком внешней энергии, могут быстро выходить из-под контроля и вести себя беспорядочно. Они могут даже становиться хаотичными и не следовать больше регулярному, предсказуемому ритму. Основу устойчивого поведения составляет простое гармоническое движение, однако нарушить его устойчивость довольно легко.

## В сухом остатке Наука качания



# 07 Закон Гука

**Закон Гука, открытый в результате наблюдений за растяжением пружин в часах, показывает, как деформируются материалы, когда к ним прилагаются силы. Упругие материалы растягиваются пропорционально приложенной к ним силе. Странно, что Роберта Гука, внесшего огромный вклад в архитектуру и естественные науки, помнят лишь благодаря этому закону. Однако, подобно его открывателю, закон Гука имеет отношение ко многим дисциплинам и используется в инженерном деле, строительстве и материаловедении.**



Возможностью узнавать время по механическим часам мы обязаны энциклопедисту XVII столетия Роберту Гуку, этот человек не только изобрел балансирующую пружину и спусковой механизм часов, но также построил «Бедлам» и ввел в биологию понятие клетки. Гук был скорее экспериментатором, чем математиком. Он устраивал в Лондонском королевском обществе публичные демонстрации научных опытов и изобрел многое множество механизмов. Исследуя пружины, он и открыл закон Гука, гласящий, что длина, на которую растягивается пружина, пропорциональна силе, с которой ее растягивают. Потяните вдвое сильнее — и пружина тоже растянется вдвое.

**Упругость** Материалы, подчиняющиеся закону Гука, называют «упругими». Упругие материалы способны как растягиваться, так и возвращаться в изначальное состояние, когда приложенная к ним сила исчезает, — растяжение их обратимо. Именно так ведут себя резиновые ленты и пружины из жесткой проволоки. С другой стороны, жевательная резинка растягивается, если ее потянуть, но так потом и остается растянутой соплей. Многие материалы демонстрируют упругость, если прикладываемая сила относительно невелика. Если же

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1660**

Гук открывает закон упругости

**1773**

Гаррисон получает награду за успешное измерение долготы

### Роберт Гук, 1635–1703

Роберт Гук родился на английском острове Уайт в семье священника. Учился в оксфордском Крайст-колледже, работал ассистентом у физика и химика Роберта Бойля. В 1660-м он открыл получивший его имя закон упругости и вскоре после этого был назначен куратором экспериментов Лондонского королевского общества. Пять лет спустя опубликован трактат «*Micrographia*», в котором Гук, занимавшийся сравнением под микроскопом растительных клеток с животными, ввел в научный оборот термин «клетка». В 1666-м он помогал отстраивать Лондон после Большого пожара, возведя вместе

с Кристофером Реном Королевскую Гринвичскую обсерваторию, монумент в память о Великом лондонском пожаре и Бетлемскую королевскую больницу (известную как «Бедлам»). Он умер в Лондоне в 1703 году, был похоронен в лондонском Бишопгейте, однако в XIX веке останки его переместили в Северный Лондон, и где они теперь, никто не знает. В феврале 2006-го был обнаружен экземпляр считавшихся давно утраченными пространственных записок Гука о собраниях Королевского общества, — сейчас они в этом же обществе и хранятся.

их растягивают слишком сильно, они лопаются или ломаются. Существуют и материалы слишком неподатливые или пластичные, чтобы их можно было назвать упругими, — к ним относятся керамика и глина.

Согласно закону Гука, для растяжения упругого материала до определенной длины всегда требуется прилагать к нему одну и ту же силу. Эта сила зависит от жесткости материала (называемой также «модулем упругости»). Для растяжения жесткого материала требуется большая сила. В число материалов с очень высокой жесткостью входят, к примеру, алмазы, карборунды и вольфрам. В число материалов более пластичных — алюминиевый сплав и дерево.

Материал, подвергаемый растяжению, деформируется. Деформация определяется как процентное увеличение длины при растяжении. Прилагаемая для этого сила (на единицу площади) именуется «напряжением». Жесткость определяется как отношение напряжения к деформации. Многие материалы, в том числе сталь, углеродное волокно и даже стекло, обладают постоянным (при малых напряжениях) модулем упругости и таким образом следуют закону Гука. При строительстве

## 1979

В британском Бристоле совершен первый прыжок с тарзанкой

зданий архитекторы и инженеры учитывают эти свойства материалов, добиваясь того, чтобы при сильных нагрузках их сооружения не растягивались и не вспучивались.

**Обратный рывок** Закон Гука касается не одних только инженеров. Тысячи туристов каждый год полагаются на него, когда совершают прыжки с тарзанкой — прыгают с высокой платформы, прикрепившись к упругому канату. Закон Гука определяет, на какую длину растянется канат под весом прыгуна. Рассчитать эту длину — дело необходимое, поскольку канат должен рвануть назад прыгуна, летящего в каньон, до того, как его голова врежется в камни. Прыжки с тарзанкой стали спортом благодаря британским сорвиголовам, которые в 1979 году прыгали с Клифтонского подвесного моста, что в Бристоле, — по-видимому, их вдохновили фильмы об обитателях Вануату, которые также прыгают с большой высоты, обвязав лодыжки лианами, — таково их испытание храбрости. Британских прыгунов арестовывали, однако они продолжали прыгать с мостов, распространяя свою идею по белому свету, пока ее не поставили на коммерческие рельсы.

**Долгота** И путешественники тоже опираются на закон Гука, хоть и по-иному — он позволяет им ориентироваться. Измерение широты при движении с севера на юг — дело нехитрое, достаточно посмотреть, как высоко поднимается солнце или звезды над горизонтом, а вот выяснить, огибая Землю с востока на запад или наоборот, долготу намного труднее. В XVII и начале XVIII столетия жизни моряков постоянно грозила опасность, потому что они не понимали, где находятся. Правительство Британии предложило денежную награду в 20 000 фунтов, огромную по тем временам сумму, тому, кто решит техническую проблему измерения долготы.

Благодаря разнице во времени вы, двигаясь в направлении восток—запад, можете измерять долготу, сравнивая локальное время в каком-то месте в море со временем в некотором другом известном вам месте, например в лондонском Гринвиче. Гринвич стоит на долготе в ноль градусов, поскольку время принято отсчитывать относительно расположенной здесь обсерватории; ныне это называется «средним временем по Гринвичу». Все это хорошо и прекрасно, но как узнать, находясь посреди Атлантики, который час в Гринвиче? Да так же, как и сегодня, — вылетая из Лондона в Нью-Йорк, вы можете прихватить с собой часы, показывающие лондонское время. Однако в начале XVIII века это было непросто. Часовая техника была тогда развита не так, как сегодня, наиболее точными часами были маятниковые, а от них на раскачивающемся корабле толку мало. Британский часовых дел мастер Джон Харрисон изобрел новые устройства, в которых вместо висящего маятника использовались покачивавшиеся на пружинах противовесы. Однако при морских испытаниях и они хорошего впечатления не произвели. Одна из связанных с пружинами проблем состояла в том, что их способность к растяжению зависит от температуры. На судах, плававших из тропиков в приполярные области, они становились бесполезными.

«Если я заглянул дальше других, то потому, что стоял на плечах гигантов»

**Исаак Ньютон, 1675**

В письме (возможно, саркастическом) к Гуку

И Гаррисон нашел новаторское решение. Он встроил в часы биметаллическую полоску, сделанную из двух разных металлов. Два металла, например медь и сталь, расширяются при нагревании по-разному, отчего такая полоска изгибается. Встроенная в часовой механизм, она компенсирует температурные изменения. Новые часы Гаррисона, получившие название «хронометр», принесли ему денежную награду и разрешили проблему определения долготы.

Вся четверка экспериментальных часов Гаррисона хранится теперь в Гринвичской обсерватории Лондона. Первые три экземпляра довольно велики, сделаны из меди и демонстрируют механизмы пружинной балансировки. Они отличаются прекрасной работой, смотреть на них — одно удовольствие. Четвертое устройство, ставшее победителем, куда компактнее и походит на большие карманные часы. Оно менее привлекательно эстетически, но зато куда более точное. Такие часы моряки использовали многие годы — пока не появились электронные кварцевые часы.

**Гук** Достижения Гука так велики, что его называли «лондонским Леонардо да Винчи». Он внес значительный вклад во многие науки, от астрономии до биологии, не оставив вниманием и архитектуру. Его знаменитое столкновение с Исааком Ньютоном привело к серьезной вражде этих ученых. Ньютон, расстроенный тем, что Гук не принял его теорию цвета, упорно отрицал приоритет Гука касаясь идеи обратной пропорциональности силы притяжения квадрату расстояния.

Удивительно, что при таком обилии достижений Гук особой славой не снискал. Не сохранилось ни одного его прижизненного портрета, да и сам закон Гука — памятник для увековечивания имени такого новатора довольно скромный.

**В сухом остатке**  
**Фантастическая упругость**

# 08 Закон идеального газа

Давление, объем и температура газа связаны между собой, и закон идеального газа определяет, как именно. Если вы нагреваете газ, он стремится расшириться; если вы сжимаете его, он занимает меньше места, но создает более высокое давление. Закон идеального газа знаком и авиапассажирам, дрожащим от одной мысли о том, какой жуткий холод стоит за бортом, и альпинистам, знающим, что по мере восхождения к вершине температура воздуха и давление будут падать. Даже Чарлз Дарвин смог обвинить закон идеального газа в том, что, когда он находился в лагере, разбитом высоко в Андах, там никак не удавалось сварить картошку.

Закон идеального газа записывается так:  
 $PV = nRT$ , где  $P$  — давление,  $V$  — объем,  $T$  — температура идеального газа,  $n$  — число молей газа (один моль содержит  $6 \times 10^{23}$  атомов газа, это «число Авогадро») и  $R$  — число, именуемое «газовой постоянной».

Если вы когда-нибудь пользовались скороваркой, значит, пользовались и законом идеального газа. Ведь что такое скороварка? Кастрюля с крышкой, пригнанной так плотно, что во время приготовления еды пар не может выйти из нее наружу. Поскольку пар, образовавшийся при кипении воды, из кастрюльки не выходит, давление внутри нее повышается. И давление может возрасти настолько, что кипящая вода больше не сможет испаряться, а потому температура варева превысит обычную температуру кипения воды, 100 градусов по Цельсию. В итоге еда приготовится быстрее, а во вкусе не потеряет.

Закон идеального газа, впервые сформулированный в XIX веке французским физиком Эмилем Клапейроном, описывает взаимосвязь давления, температуры и объема газа. Давление возрастает и при уменьшении объема, и при росте температуры. Представьте себе коробку с воздухом. Если вы сумеете уменьшить объем коробки вдвое, давление в ней удвоится. Если нагреете коробку, удвоите ее начальную температуру, опять-таки удвоится и давление в ней.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

350 до н.э.

Аристотель утверждает, что «природа не терпит пустоты»

1650 н.э.

Отто фон Герике строит первый вакуумный насос

Выводя закон идеального газа, Клапейрон объединил два более ранних закона — один был получен Робертом Бойлем, другой Жаком Шарлем и Жозефом Луи Гей-Люссаком. Бойль обнаружил связь между давлением и объемом, а Шарль и Гей-Люссак — между объемом и температурой. Клапейрон соединил три этих параметра, размышляя о количестве газа, именуемом «молем», — этот термин описывает определенное число атомов или молекул, а именно  $6 \times 10^{23}$  (6 с 23 нулями), известное также как число Авогадро. Число это выглядит колоссальным, но примерно столько атомов вы найдете в графитовом стержне карандаша. Моль определяется как число атомов углерода-12 в 12 граммах углерода. Можно сказать и так: если собрать число грейпфрутов, равное числу Авогадро, они займут объем, равный объему Земли.

**Идеальный газ** Но что же такое идеальный газ? Попросту говоря, это газ, который подчиняется закону идеального газа. А делает он это потому, что атомы или молекулы, из которых он состоит, очень малы в сравнении с расстояниями между ними и потому, сталкиваясь, просто отскакивают друг от дружки, не задевая соседей. Кроме того, в таком газе не существует дополнительных сил, которые могли бы заставить их слипаться, подобно частицам с разными электрическими зарядами.

«Благородные» газы, такие как неон, аргон и ксенон, ведут себя как идеальный газ, состоящий из отдельных атомов (а не молекул). Легкие симметричные молекулы — водород, азот, кислород — ведут себя почти как идеальные газы, но чем тяжелее молекулы газа — бутана, к примеру, — тем более отклоняется он в своем поведении от идеального.

Газы обладают очень низкой плотностью, их атомы или молекулы никак не соединяются друг с другом, но двигаются совершенно свободно. В идеальном газе атомы ведут себя, как резиновые шарики, выброшенные на корт для игры в сквош, — стучаются один о другой и о стенки сосуда, в котором находится газ. Собственных границ газ не имеет, но может содержаться в сосуде определенного объема. При уменьшении этого объема расстояние между частицами газа сокращается, отчего, согласно газовому закону, возрастают давление и температура.

Давление идеального газа порождается силой, с которой атомы и молекулы ударяются о стенки сосудов и друг о друга. Согласно третьему закону Ньютона (см. с. 10), отскакивающие после столкновений частицы воздействуют на стенки с той же силой, с какой и она на них, но противоположно направленной. Столкновения со стенками упруги, то

«**Есть обнадеживающий символизм в том, что в вакууме флаги не развеваются**»

Артур Ч. Кларк, р. 1917

**1662**

Сформулирован закон Бойля ( $PV = \text{constant}$ )

**1672**

Изобретается автоклав («пароварка») Папена

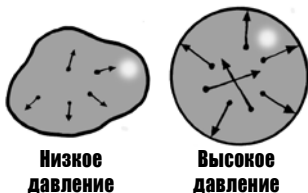
**1802**

Сформулирован закон Шапли и Гей-Люссака ( $V/T = \text{constant}$ )

**1834**

Клапейрон формулирует закон идеального газа

есть частицы газа отскакивают, не теряя энергию и не приликая, однако передают сосуду импульс, который и воспринимается как давление. Импульс мог бы и сдвигать сосуд с места, однако сосуд противится перемещению, а силы ударов действуют в самых разных направлениях, в среднем уравнивая друг друга.



Повышение температуры увеличивает скорость частиц газа, так что давление на стенки еще усиливается.

Тепловая энергия передается молекулам, увеличивая их кинетическую энергию и заставляя двигаться быстрее.

Ударяясь о стенки, они передают им больший импульс, что опять-таки приводит к росту давления.

Уменьшение объема увеличивает плотность газа, отчего столкновения со стенками происходят чаще, — снова повышается давление. Повышается и температура, а закон сохранения энергии приводит к тому, что молекулы, получая меньше пространства для полетов, начинают ускоряться.

Некоторые из реальных газов не следуют этому закону в точности. Если газ состоит из больших и сложных молекул, в нем могут возникать дополнительные силы, да и слипаются такие молекулы чаще, чем в идеальном газе. Силы слипания могут возникать благодаря электрическим зарядам атомов, из которых состоят молекулы, проявление их более вероятно, когда газ сильно сжат или сильно охлажден, поскольку при таких условиях молекулы движутся медленно. По-настоящему липкие молекулы — белков или жиров — вообще никогда газов не образуют.

**Давление и высота над уровнем моря** Когда вы поднимаетесь на гору, атмосферное давление падает в сравнении с давлением на уровне моря — просто потому, что слой атмосферы над вами становится тоньше. Возможно, вы замечали, что это сопровождается и падением температуры. При полете на самолете температура за его бортом падает значительно ниже точки замерзания воды. Все это — проявления закона идеального газа.

На большой высоте атмосферное давление невелико, отчего вода закипает при более низкой, чем на уровне моря, температуре. В результате продукты не провариваются, поэтому альпинисты иногда используют скороварки. Еще Чарлз Дарвин сокрушался, что во время путешествия по Андам в 1835 году у него такой при себе не было, хотя он знал о «пароварке», изобретенной французским физиком Денисом Папеном в конце XVII века.

Вот что писал Дарвин в своем «Путешествии натуралиста вокруг света на корабле “Бигль”»:

*В том месте, где мы ночевали, вода, как и следовало ожидать, вследствие пониженного атмосферного давления кипела при температуре более низкой, чем в местах, лежащих не так высоко, – явление, обратное тому, какое происходит в папеновом котле. По этой причине картофель, находившийся несколько часов в кипящей воде, остался почти таким же твердым. Котелок простоял на огне всю ночь, на следующее утро снова кипел, и все-таки картофель не сварился. Я узнал об этом, подслушав разговор двух моих спутников; они рассудили просто – что “проклятый котелок (а он был новый) не желает варить картофель”.*

**Вакуум** Если вам удастся взлететь с горы вверх, выйти за пределы атмосферы – быть может, в космос, – то давление упадет почти до нуля. Совершенный вакуум не содержит никаких атомов, однако в пределах вселенной его нигде не существует. Даже в космосе найдутся редкие атомы – скажем, несколько атомов водорода на кубический сантиметр. Греческие философы Платон и Аристотель не верили в существование чистого вакуума, поскольку «ничто» не существует.

В наше время квантовая механика также отмечает идею вакуума как пустого пространства, утверждая, что он кишит элементарными частицами, нарождающимися и исчезающими. Космология утверждает даже, что в космосе может существовать отрицательное давление, проявляющееся как темная энергия, которая убыстряет расширение вселенной. Похоже, природа и вправду не терпит пустоты.

## В сухом остатке Физика скороварки



# 09 Второе начало термодинамики

**Второе начало термодинамики — это основа основ современной физики. Оно гласит, что тепло передается от разогретых тел к холодным, но не передается назад. Поскольку теплота есть мера беспорядка, или энтропии, другая формулировка закона выглядит так: в изолированной системе энтропия всегда возрастает. Второе начало связывает ход времени и совершающиеся во вселенной события с ее конечной участью.**

Если вы наливаете горячий кофе в стакан с кубиками льда, лед согреться и тает, а кофе охлаждается. Но задавались ли вы когда-нибудь вопросом, почему температура кофе не повышается? Ведь кофе мог бы вытянуть из льда остатки тепла, стать горячее, а лед стал бы еще холоднее. Опыт говорит нам, что так не бывает. Но почему?

Тенденция горячих и холодных тел обмениваться теплом и приобретать равную температуру отражена вторым началом термодинамики. В общем и целом оно гласит, что тепло не может переходить от холодного тела к горячему.

А как же тогда работают холодильники? Как нам удастся охладить стакан апельсинового сока, если передать его тепло чему-то другому невозможно? Второе начало позволяет проделать это, но лишь при особых условиях. Охлаждая что-либо, холодильник генерирует большое количество тепла, в чем легко убедиться, приложив ладонь к его задней стенке. И поскольку он высвобождает тепло, то нарушения второго начала не происходит — нужно просто учитывать общую энергию холодильника и его окружения.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1150**

Бхаскара выдвигает идею вечно вращающегося колеса

**1824**

Сади Карно закладывает основы термодинамики

**Энтропия** Теплота есть мера беспорядка, а в физике беспорядок часто получает количественное выражение как «энтропия» — мера способов, которыми может организовываться система, состоящая из многих элементов. Скажем, пакет с сухими макаронами обладает низкой энтропией, поскольку макароны в нем упорядочены, но бросьте их в кастрюлю с кипятком — они переплетутся, порядка станет меньше, а энтропия их возрастет. Точно так же аккуратные ряды игрушечных солдатиков обладают низкой энтропией, а если рассыпать их по полу, энтропия солдатиков повысится.

Но какое отношение имеет все это к холодильникам?

Одна из формулировок второго начала термодинамики выглядит так: энтропия ограниченной системы возрастает и никогда не уменьшается. Температура связана с энтропией напрямую — холодные тела обладают малой энтропией. Их атомы неупорядочены в меньшей мере, чем раскачивающиеся атомы нагретых тел. Поэтому любое изменение энтропии системы с учетом всех ее составляющих порождает в конечном счете только один эффект: энтропия растет.

Что касается холодильника, охлаждение апельсинового сока уменьшает его энтропию, однако уменьшение это компенсируется производимым холодильником нагревом воздуха. Фактически увеличение энтропии воздуха превышает уменьшение энтропии охлаждением продуктов. Если рассматривать систему в целом — холодильник и его окружение, — второе начало термодинамики остается справедливым. Еще одна его формулировка сводится к тому, что энтропия возрастает всегда.

Второе начало справедливо для изолированных систем, в которые энергия не поступает извне и из которых она не выводится. В ней работает закон сохранения энергии. Вселенная и сама является изолированной системой в том смысле, что вне ее, по определению, ничего не существует. Таким образом, во вселенной энергия сохраняется, а энтропия должна возрастать. В малых ее областях может происходить незначительное уменьшение энтропии, связанное, скажем, с охлаждением, однако оно компенсируется, как и в случае холодильника, нагревом в других областях и таким увеличением их энтропии, что суммарная энтропия вселенной растет.

**«Точно так же, как увеличение энтропии является основным законом вселенной, основной закон жизни состоит в том, что она становится более структурированной и борется с энтропией»**

**Вацлав Гавел, 1977**

**1850**

Рудольф Клаузиус дает определение энтропии и формулирует 2-е начало термодинамики

**1860**

Максвелл постулирует существование своего «демона»

**2007**

Ли объявляет о создании машины, в которой работает демон Максвелла

## (Не)модная вселенная

Не так давно астрономы попытались определить усредненный цвет вселенной по сумме свечения всех звезд. Оказалось, что он не желтый, как у Солнца, не розовый и не синий, а довольно унылый — бежевый. Через миллиарды лет, когда энтропия одолеет наконец гравитацию, вся вселенная станет однородно бежевой.

Но как же оно выглядит, возрастание энтропии? Если налить шоколадный сироп в стакан молока, все начнется с низкого значения энтропии — молоко и сироп образуют ясно различимые белый и коричневый слои. Если же вы увеличите энтропию, размешав напиток ложкой, молекулы молока и сиропа перемешаются. Максимальный беспорядок возникнет в стакане, когда сироп полностью смешается с молоком и напиток приобретет коричневатый оттенок.

Вспомните еще раз о вселенной как о целом — второе начало подразумевает, что со временем атомы в ней становятся все более неупорядоченными. Любые блоки вещества будут медленно рассыпаться, пока их атомы не заполнят всю вселенную. То есть конечное состояние вселенной, бывшей поначалу многоцветным ковром из звезд и галактик, — это серый океан беспорядочно перемешанных атомов. Когда вселенная расширится настолько, что галактики начнут распадаться, а вещество, из которого они состоят, — разжижаться, останется лишь подобие супа из частиц. И если предположить, что расширение вселенной продолжится, то конечным ее состоянием будет «тепловая смерть».

**Вечное движение** Поскольку теплота есть форма энергии, ее можно заставить работать. Паровой двигатель преобразует тепло в механическое движение поршня или турбины, которая может вырабатывать электричество. Большая часть термодинамики и была разработана в XIX веке для связанных с паровыми двигателями практических нужд, а не выведена физиками на бумаге. Еще одно следствие второго начала состоит в том, что паровые двигатели, как и другие, работающие на тепловой энергии, далеко не совершенны. Любой процесс, преобразующий тепло в другую форму энергии, связан с утратой малой ее части, а в итоге энтропия системы в целом возрастает.

Идея вечного двигателя — машины, которая никогда не теряет энергию и потому может работать вечно, — преследовала ученых еще со времен Средневековья. Вторым законом термодинамики положил конец их надеждам, однако до того, как он был сформулирован, они успели предложить множество конструкций таких машин. Воображение Роберта Бойля рисовало чашу, которая переливала воду из себя в себя же саму, индийский математик Бхаскара придумал колесо, которое само себя крутит, перемещая закрепленные на его спицах грузы. При ближайшем рассмотрении выяснялось, что такие двигатели теряют энергию. Идеи, подобные этим, получили столь широкое распространение, что уже в XVIII столетии слова «вечный двигатель» приобрели

дурную славу. И Французская королевская академия наук, и американское Бюро патентов попросту запретили рассматривать предложения, касающиеся вечных двигателей. И сегодня эти машины принадлежат к области, в которой подвизаются чудаковатые изобретатели-кустари.

**Демон Максвелла** Одна из вызвавших наибольшие споры попыток обойти второе начало термодинамики была предложена в 1860-х шотландским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом в виде мысленного эксперимента. Представим себе два стоящих бок о бок прямоугольных сосуда с газом одной температуры. В стенках сосудов имеется по маленькому отверстию, которое позволяет частицам газа переходить из сосуда в сосуд. Если нагреть один сосуд, частицы, проходя через это отверстие, постепенно выровняют температуры. Максвелл представил себе, что у отверстия сидит крошечный демон, микроскопический чертенок, который вылавливает самые быстрые молекулы одного сосуда и пропихивает их в другой. В результате средняя скорость движения молекул второго сосуда возрастает за счет молекул первого. Стало быть, постулировал Максвелл, тепло будет переноситься из сосуда похолоднее в сосуд погорячее. Разве такой процесс не окажется нарушением второго начала термодинамики? Не позволит ли правильный отбор молекул переносить тепло из холодного тела в горячее?

С тех пор физики безуспешно пытались объяснить, почему демон Максвелла работать ну никак не может. Многие из них говорили, что процесс измерения скоростей частиц, а затем открывания и закрывания соединяющего сосуда люка потребует работы, а значит, и затрат энергии, а это означает, что полная энтропия системы не уменьшится. Ближе всех подошел к реализации «демона Максвелла» в наноразмерных масштабах эдинбургский физик Дэвид Ли. Его устройство действительно отделяло быстрые частицы от медленных, но для этого ему требовался внешний источник энергии. Поскольку механизма, который мог бы перемещать частицы без использования внешней энергии, не существует, обойти второе начало термодинамики физикам не удалось и поныне. По крайней мере, до сей поры оно держится.

**Альтернативные формулировки  
начал термодинамики**

*Первое начало:*

**Победить ты не можешь**

(см. «Сохранение энергии», с. 20).

*Второе начало:*

**Ты можешь только проиграть**

(см. с. 36).

*Третье начало:*

**Выйти из игры тебе тоже  
не удастся**

(см. «Абсолютный ноль»,  
с. 40).

## В сухом остатке Закон беспорядка

# 10 Абсолютный ноль

**Абсолютный ноль — это воображаемая температура, при достижении которой вещество охлаждается настолько, что атомы его перестают совершать движение. Достигнут абсолютный ноль никогда не был — ни в природе, ни в лаборатории. Однако ученые подбирались к нему очень близко. Не исключено, что дойти до абсолютного ноля можно, но, даже дойдя, мы не сможем это узнать, потому что не существует термометра, который способен его измерить.**

Измеряя температуру какого-либо тела, мы регистрируем среднюю энергию частиц, из которых оно состоит. Температура показывает, насколько быстро колеблются или движутся эти частицы. В газе или жидкости частицы могут летать в любом направлении и при этом они нередко соударяются. Поэтому температура их связана со средней скоростью движения частиц. Атомы твердого тела закреплены в решеточной структуре и удерживаются в ней электрическими связями. При разогреве тела атомы приобретают энергию и начинают подрагивать, точно желе, не покидая, однако, своих мест.

Если вы охлаждаете вещество, его атомы совершают меньше движений. В газе снижается их скорость, в твердом теле сокращается число колебаний. Чем ниже падает температура, тем меньше становится движения. При достаточной степени охлаждения атомы вообще перестают двигаться. Эта гипотетическая пока что точка и называется «абсолютным нолем».

**Шкала Кельвина** Идея абсолютного ноля появилась в XVIII веке при экстраполяции графика температуры и энергии к нолю. Энергия устойчиво возрастает вместе с температурой, и линию,

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1702**

Гийом Амонтон выдвигает идею абсолютного ноля

**1777**

Ламберт предлагает абсолютную температурную шкалу

**1802**

Гей-Люссак определяет абсолютный ноль как  $-273$  по Цельсию

соединяющую два ее значения, можно продлить в сторону уменьшения до температуры, при которой энергия становится нулевой:  $-273,15$  градуса по шкале Цельсия, или  $-459,67$  градуса по шкале Фаренгейта.

В XIX веке лорд Кельвин предложил новую температурную шкалу, начинающуюся с абсолютного нуля. По сути дела, это просто сдвинутая шкала Цельсия. Так, вода замерзает при  $0$  градусов по Цельсию, или при  $273$  градусах по Кельвину, а закипает при  $373$  градусах по Кельвину (эквивалент  $100$  градусам Цельсия). Высшие участки этой шкалы фиксированы, как и тройная точка воды — температура (при определенном давлении), при которой вода, пар и лед могут сосуществовать, — это  $273,16$  по Кельвину, или  $0,01$  по Цельсию, при малом давлении (меньше  $1\%$  атмосферного). В настоящее время для измерения температуры большинство ученых использует шкалу Кельвина.



**Большой мороз** Какие ощущения может породить абсолютный ноль? Мы знаем, как ощущается точка замерзания или снегопад. Мы вдыхаем холодный воздух, пальцы у нас немеют. В общем, нам довольно холодно. В некоторых районах Северной Америки и Сибири температура может понижаться зимой еще на  $10$  или  $20$  градусов, а на Южном полюсе достигать  $-70$  градусов по Цельсию. Самая низкая природная температура на Земле,  $-89$  градусов по Цельсию, или  $184$  по Кельвину, была зафиксирована в  $1983$  году на станции «Восток», находящейся в самом сердце Антарктиды.

Температура падает и когда вы забираетесь высоко в горы или поднимаетесь на самолете. Если же выбраться в космос, там окажется еще холоднее. Но даже в самых пустых глубинах вселенной самые холодные атомы обладают температурой, на несколько градусов превышающей абсолютный ноль. Наиболее холодное место, найденное пока во вселенной, находится в туманности Бумеранг, темном облаке газа с температурой всего на один градус выше абсолютного нуля.

**«Поскольку я люблю держать мое фруктовое мороженое при абсолютном нуле, я использую градусы Кельвина чаще, чем большинство американцев. По моему, любой десерт упоителен, если в нем напрочь отсутствует движение молекул»**

Чак Клостерман, 2004

**1848**

Устанавливается температурная шкала Кельвина

**1900**

Кельвин читает лекцию о «двух облаках»

**1930**

Экспериментальные измерения позволяют с большей точностью определить абсолютный ноль

**1954**

Абсолютный ноль официально определяется как  $-273,15$  градуса Цельсия

Вне этой туманности, во всем пустом пространстве температура среды держится на довольно приятном уровне в 2,7 градуса Кельвина. Это такая теплая ванна, наполненная космическим микроволновым фоновым излучением, оставшимся со времен Большого взрыва и пронизывающим все пространство вселенной (см. с. 182). Чтобы охладить какой-нибудь регион вселенной, его нужно оградить от этого реликтового тепла, — тогда любые атомы в нем утратят остаточную температуру. Поэтому представить себе, что температура какого-либо места во вселенной может равняться абсолютному нулю, трудно.

**Внутренний холод** Температуры очень низкие удавалось получать в лабораториях, где физики пытались приблизиться к абсолютному нулю хотя бы на короткие промежутки времени. И они смогли подойти к нему очень близко — ближе, чем в открытом космосе.

В лабораториях используются в качестве охладителей многие жидкие газы, однако и они теплее абсолютного нуля. Можно охладить азот до жидкого состояния — этот газ переходит в него при 77 градусах Кельвина (–196 Цельсия). Жидкий азот легко транспортируется в особых емкостях и используется в больницах для хранения биологических образцов, в том числе для замораживания эмбрионов и спермы в клиниках для больных бесплодием; находит он применение и в современной электронике. Если капнуть жидким азотом на цветок гвоздики, он станет до того хрупким, что уроните его на пол — и он разобьется, точно фарфоровый.

Еще холоднее жидкий гелий — всего 4 градуса Кельвина, однако и эта температура изрядно выше абсолютного нуля. А вот при смешивании двух типов гелия — гелия-3 и гелия-4 — достигается температура в несколько тысячных градуса Кельвина.

Для достижения температур еще более низких физикам приходится использовать изощренные методы. В 1994-м ученые Американского национального института стандартов и технологии (NIST), находящегося в Боулдере, штат Колорадо, с помощью лазера охладили атомы цезия до 700 миллиардных градуса Кельвина.

Девять лет спустя ученым Массачусетского технологического института удалось пойти дальше, достигнув 0,5 миллиардных градуса Кельвина.

**«В первую половину его карьеры Томсон казался неспособным ошибиться, во вторую — неспособным на правоту»**

**Ч. Уотсон, 1969**  
(биограф лорда Кельвина)

На самом-то деле абсолютный ноль — идея абстрактная. Такую температуру никогда не удавалось получить в лаборатории или измерить в природе. Ученым, подбирающимся к ней все ближе, приходится мириться с тем, что достигнуть ее никогда не удастся.



### Лорд Кельвин, 1824–1907

Британский физик лорд Кельвин, урожденный Уильям Томсон, обращался ко многим проблемам электричества и теплоты, хотя более всего он известен помощью, оказанной им прокладчикам первого трансатлантического подводного телеграфного кабеля. Томсон опубликовал более 600 работ и был избран президентом престижного Лондонского королевского общества. Ученым он был консервативным — отказывался признать существование атомов, отвергал теорию эволюции Дарвина и родственные теории возрастов Земли и Солнца, из-за чего проигрывал множество научных споров. Он получил титул лорда Кельвина Ларгского (по названию реки Кельвин, которая протекает по территории

университета Глазго, и города Ларгса на побережье Шотландии, в котором он жил). В 1900-м лорд Кельвин прочитал в Королевском институте Великобритании знаменитую ныне лекцию, в которой оплакивал то обстоятельство, что «красоту и ясность теории» затмили «два облака», а именно не избавившаяся к тому времени от недостатков теория излучения черного тела и неудавшаяся попытка обнаружить «эфир», или газовую среду, в которой, как тогда предполагалось, распространяется свет. Эти проблемы были в дальнейшем разрешены теорией относительности и квантовой теорией, но Томсон старался справиться с ними, используя ньютоновскую физику своего времени.

Но почему? Во-первых, любой термометр, сам не имеющий температуру абсолютного нуля, будет отдавать тепло и тем самым сорвет опыт. Во-вторых, измерять температуру при столь низких энергиях вообще затруднительно — начинают работать такие эффекты, как сверхпроводимость, вмешивается квантовая механика, а это воздействует на движение и состояние атомов. Так что мы просто не сможем узнать наверняка, что уже добрались до абсолютного нуля. Абсолютный ноль — это тот самый случай, когда «нет там никакого там»\*.

\* Цитата из «Всеобщей автобиографии» Гертруды Стайн (1874–1846). — *Здесь и далее примеч. перев.*

## В сухом остатке Большой холод

# 11 Броуновское движение

Броуновское движение — это беспорядочные перемещения малых частиц, возникающие вследствие их столкновения с невидимыми молекулами воды или газа. Первым его обнаружил ботаник Роберт Броун — частицы пыльцы, которые он разглядывал под микроскопом на мокром предметном стекле, двигались рывками, — однако описать математически смог только Альберт Эйнштейн. Броуновское движение объясняет, как распространяется в спокойном воздухе пыльца, но и описывает также множество случайных процессов — от наводнений до скачков на фондовом рынке. Его непредсказуемые рывки связаны с фракталами.

В XIX веке ботаник Роберт Броун, разглядывая под микроскопом частицы пыльцы, обнаружил, что они не стоят на месте, но отрывисто двигаются. На миг он задумался — уж не живые ли они? Нет, конечно, просто их сбивали с места молекулы воды, которой Броун смачивал предметные стекла. Частицы пыльцы двигались хаотично, иногда лишь немного, иногда на довольно большие расстояния, и в конечном счете совершали по стеклу путь, предсказать который было невозможно. И многие ученые начали задумываться над открытием Броуна, названным в его честь «броуновским движением».

**Случайное блуждание** Броуновское движение совершается потому, что крошечные частицы пыльцы получают небольшой удар при каждом их столкновении с молекулой воды. Эти невидимые молекулы движутся и сами, постоянно налетая одна на другую, налетают они и на частицы пыльцы, срывая их с места.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

420 до н. э.

Демокрит постулирует существование атомов

1827 н. э.

Броун наблюдает движение частиц пыльцы и предлагает описание его механизма

Даже при том, что частица пылицы в сотни раз больше молекулы воды, в каждый момент времени ее ударяет много молекул, движущихся в случайных направлениях, и это создает дисбаланс сил, сдвигающих ее с места. Это происходит снова и снова, и потому пихаемая отовсюду частица совершает зигзагообразный путь, немного напоминающий путь с трудом держащегося на ногах пьяницы. Предсказать этот путь наперед невозможно, поскольку молекулы толкают ее случайным образом и частица может срываться с места в любом направлении.

Броуновское движение совершается любыми малыми частицами, находящимися во взвешенном состоянии в жидкости или газе. Его можно наблюдать даже у довольно больших частиц, например частиц дыма, — при большом увеличении видно, какие зигзаги они описывают в воздухе. Сила получаемых частицами ударов зависит от импульса молекул. Она оказывается большей в случае тяжелых молекул жидкости либо газа — как и в случае быстро движущихся, например, молекул нагретой жидкости.

Во второй половине XIX века предпринималась не одна попытка описать броуновское движение математически, однако сделать это смог лишь Эйнштейн в 1905 году, когда он также опубликовал специальную теорию относительности и дал описание фотоэффекта, за что получил Нобелевскую премию. Эйнштейн воспользовался тепловой теорией, основанной на столкновениях молекул, и успешно объяснил движения частиц, которые наблюдал Броун. Поняв, что броуновское движение доказывает существование молекул жидкостей, физики вынуждены были принять и учение об атомах, которое даже в начале XX века еще вызывало сомнения.



**Случайное блуждание  
при броуновском движении**

**Диффузия** Со временем броуновское движение способно заставить частицу пройти значительное расстояние, хоть, разумеется, и не такое, какое она могла бы пройти, если бы никто не мешал ей двигаться по прямой. Это объясняется случайным характером движения молекул, которые с равной вероятностью могут толкать ее и вперед, и назад. Поэтому, если уронить в жидкость плотную группу частиц, они начнут рассеиваться (диффундировать) во все стороны даже при том, что жидкость никто не будет помешивать и никакие потоки в ней не возникнут. Каждая частица

**1905**

Эйнштейн дает математическое описание броуновского движения

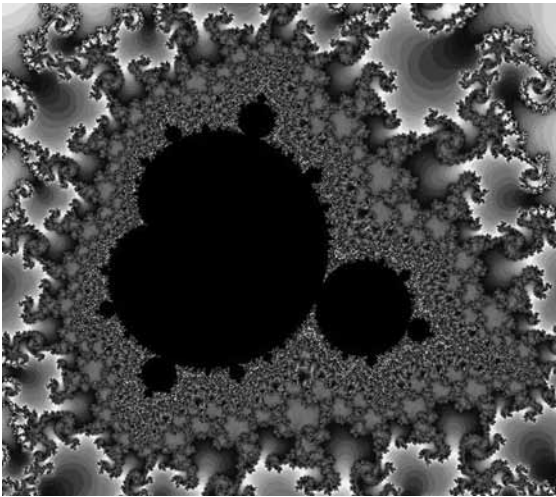
**1960**

Мандельброт открывает фракталы

пойдет по своему пути, и капля начнет расширяться, образуя диффузное облако. Такое рассеяние играет важную роль в распространении загрязнений воздуха, имеющих точечный источник, например в распространении аэрозоля в атмосфере. Даже при полном отсутствии ветра химические вещества будут рассеиваться в воздухе вследствие одного лишь броуновского движения.

**Фракталы** Путь, по которому следует частица, совершающая броуновское движение, дает нам пример фрактала. Каждый прямой отрезок этого пути может иметь любую длину и любое направление, однако некоторый общий рисунок все же существует. Этот рисунок несет в себе определенную структуру, в каком масштабе его ни разглядывай — от наименьшего из вообразимых до очень больших. А это и есть определяющее свойство фрактала.

Фракталы были в 1960-х и 1970-х предложены Бенуа Мандельбротом как метод представления самоподобных фигур в количественной форме. Фракталы — это фигуры, которые при любом масштабе выглядят одинаково. Если увеличить малый кусочек этой фигуры, вы увидите точно такую же, неотличимую от первой, рассматриваемой в большем масштабе, поэтому определить степень увеличения, глядя на фигуру, ни за что не удастся. Такая безмасштабная повторяемость часто встречается в природе — в рисунке береговой линии, в ветвях дерева, в листьях папоротника, в шестикратной симметрии снежинки.



Фракталы отличаются тем, что их длина или размерность не зависят от того, с каким увеличением вы их рассматриваете. Если вы решите измерить расстояние между двумя приморскими городами, Лендс-Эндом и Маунтс-Беем, то скорее всего придете к выводу, что оно составляет 30 км, однако вспомните про все береговые скалы и попробуйте обвить каждую веревкой — и вы обнаружите, что веревка вам понадобится в сотню километров длиной. Если же вы пойдете еще дальше и затеете обмерять каждую песчинку берега, веревку придется удлинить до многих сотен

километров. Выходит, что абсолютная длина береговой линии зависит от масштаба, в котором вы проводите измерения. Ограничьтесь грубым очертанием берега — и вы снова вернетесь к уже знакомым вам 30 км. В этом смысле фрактальная размерность есть мера огрубления чего-то, будь то облако, дерево или горный хребет. Многие из фрактальных форм, например береговую линию, можно получить соединением шагов случайного движения — отсюда и их связь с броуновским движением.

Математика броуновского движения, или последовательность случайных шагов, может использоваться для создания фрактальных фигур, находящих применение во многих областях науки. С ее помощью можно создавать грубо очерченные виртуальные пейзажи — горы, деревья, облака — компьютерных игр, ее можно использовать в программах пространственного картирования, которые помогают роботам двигаться по сильно пересеченной местности, моделируя ее возвышенности и низины. Врачи применяют ее для медицинской визуализации, когда у них возникает нужда проанализировать структуру сложных органов тела, скажем легких, в которых ветвящиеся структуры присутствуют во всех масштабах, от грубого до совсем малого.

Идеи броуновского движения используются и для предсказания рисков либо событий будущего, которые являются суммарным результатом множества случайных воздействий — наводнений, колебаний фондового рынка. Фондовый рынок можно рассматривать как портфель ценных бумаг, стоимость которых варьируется случайным образом, напоминая броуновское движение множества молекул. Фигурирует оно и в моделировании других социальных процессов, относящихся к производству товаров и принятию решений. Броуновское движение с его случайным характером обладает значительным влиянием и появляется во множестве обличий — не в одном только танце чаинки в чашке горячего чая.

## В сухом остатке Незримый микроскопический танец

# 12 Теория хаоса

Теория хаоса утверждает, что любые мельчайшие изменения способны породить серьезные последствия. Если вы покинете дом с опозданием на 30 секунд, вам, возможно, и не удастся поспеть на автобус, но вы можете встретить кого-то, кто предложит вам новую работу, и судьба ваша полностью изменится. Наиболее известное применение теории хаоса — прогнозирование погоды: крошечный порыв ветра на одной стороне планеты может привести к урагану на другой, это называется «эффектом бабочки». Однако хаос не хаотичен в буквальном смысле слова, поскольку он рождает повторяющиеся сценарии.

Трепетание крыльев бабочки в Бразилии может привести к смерчу в Техасе. Так говорит теория хаоса. Она признает, что некоторые системы могут, начиная с одной и той же, без малого, исходной точки, демонстрировать очень разнообразное поведение. Одна из таких систем — погода. Очень незначительное изменение температуры или давления в одном месте может привести к цепи событий, которые станут причиной проливного дождя в другом месте.

«Хаос» — слово отчасти неверное. Хаос не является хаотичным в смысле полного буйства, непредсказуемости или отсутствия структуры. Хаотические системы детерминистичны: если вы точно знаете начальную точку, поведение их становится и предсказуемым, и воспроизводимым. Цепочки событий, которые разворачиваются одинаково всякий раз, как вы пробуете их воспроизвести, описываются простой физикой. Однако, если вы возьмете один конечный исход этой цепочки, оказывается невозможным вернуться назад и указать, откуда все началось, потому что к результату могут вести несколько путей. Дело

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1880**

Биллиарды Адамара демонстрируют хаотическое поведение

в том, что различия между условиями, приводящими к результату, могут быть крайне незначительными и даже неизмеримыми. И потому мельчайший сдвиг в начальных условиях приводит к сильно расходящимся результатам. Из-за такой расходимости неуверенность в точном начальном условии процесса может приводить к огромному диапазону последующих поведений системы. Вернемся к предсказанию погоды: если вы ошибетесь в определении температуры легкого ветерка хотя бы на долю градуса, ваш прогноз может оказаться совершенно неверным и вы получите вместо сильной грозы в соседнем городе всего лишь легкий дождичек — или же яростный торнадо. Потому-то метеорологи и ограничены в долгосрочности своих предсказаний. Даже при огромном объеме данных о состоянии атмосферы, которым метеорологов снабжает целый рой вращающихся вокруг Земли искусственных спутников и наземных станций, предсказывать погоду удается лишь на несколько дней вперед. А дальше неопределенности становятся слишком большими, и причина тому — хаос.

**Развитие теории** Теория хаоса была в полном объеме разработана в 1960-х годах американским математиком и метеорологом Эдвардом Лоренцом. Используя компьютер для моделирования погоды, Лоренц заметил: его программа дает огромные расхождения в конечных прогнозах всего лишь потому, что входные данные округляются по-разному. Чтобы облегчить вычисления, он разбил программу на два блока — первый распечатывал результаты своей работы, а затем Лоренц вручную вводил полученные числа во второй. В распечатке числа округлялись до трех десятичных разрядов после запятой, между тем как компьютер работал с шестью разрядами. И когда 0,123456 заменялось в середине вычислений округленным 0,123, прогноз погоды, обнаружил Лоренц, получался совершенно иным. Крошечные ошибки, возникавшие при округлении, оказывали огромное воздействие на конечное предсказание погоды. Модели Лоренца были воспроизводимыми, о случайности их поведения не могло идти и речи, и оттого объяснить такие расхождения было трудно. Почему мельчайшие изменения в программе дают в одном случае тихую ясную погоду, а в другом — катастрофический шторм?

Приглядевшись к ним повнимательнее, Лоренц понял, что конечные типы погоды ограничены определенным набором, который он назвал аттрактором. Меняя входные данные, породить какой угодно тип погоды было невозможно, предпочтение отдавалось определенному набору типов, даже при том, что точно предсказать, какой из них будет отвечать тем или иным входным данным, было затруднительно. Это и есть ключевая особенность хаотических систем — все они следуют определенной схеме, но конкретную конечную точку невозможно спроецировать назад, на конкретную начальную, по той причине, что к окончательному результату ведут перекрывающиеся

**1961**

Лоренц работает  
над прогнозами погоды

**2005**

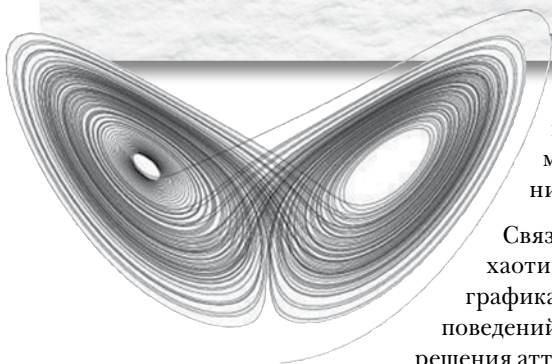
Обнаруживается хаотичное  
движение спутников Нептуна  
по их орбитам



## Эффект бабочки

Основную идею теории хаоса, состоящую в том, что малые изменения могут приводить к серьезным и крупным последствиям, часто называют «эффектом бабочки». Лоренц представил себе такую картину: бабочка, взмахивая крыльями, порождает смерч. Идея эта широко использовалась — особенно в связи с путешествиями во времени — в кино и художественной культуре. Один из фильмов так и называется — «Эффект бабочки». Эта идея использована даже

в знаменитом «Парке юрского периода». Собственно говоря, еще в 1946 году был снят фильм «Эта прекрасная жизнь», герою которого, Джорджу, ангел показывает, в какое жалкое место обратился бы его родной город, если бы он не появился на свет. Ангел говорит: «Ты получил замечательный подарок, Джордж: возможность увидеть, каким был бы мир без тебя». Джордж узнает, что один лишь факт его существования спас человека от гибели в реке, и понимает: прожитая им жизнь действительно прекрасна.



потенциальные пути. Существует множество различных способов достижения конечного результата.

Связи между входом и выходом конкретной хаотической системы можно представить в виде графика, показывающего диапазон ее возможных поведений. Такой график изображает возможные решения аттрактора и именуется иногда «странным аттрактором». Знаменитый пример — аттрактор Лоренца,

который выглядит как ряд наложенных друг на друга чуть

сдвинутых и слегка измененных одна по сравнению с другой фигур, обладающих зеркальной симметрией, создающей изображение раскрытых крыльев бабочки.

Теория хаоса появилась примерно тогда же, когда были открыты фракталы. На самом деле они тесно связаны. Аттрактор показывает, что хаотические решения многих систем могут выглядеть как фракталы, — тонкая структура аттрактора много раз повторяется в нем на разных уровнях уменьшения.

**Ранние примеры** Несмотря на то что появление компьютеров помогло приступить к разработке теории хаоса, позволило математикам рассчитывать поведение хаотических систем при различных входных данных, самые простые из систем,

демонстрирующих хаотическое поведение, были обнаружены намного раньше. Например, в конце XIX века было признано, что понятие хаотичности применимо к траекториям бильярдных шаров и стабильности планетарных орбит.

Жак Адамар занимался математикой движения частиц по неровной поверхности — скажем, мяча по полю для игры в гольф, — получившего название «бильярды Адамара». На некоторых поверхностях траектории частиц становятся нестабильными, и частицы вылетают за пределы системы. Другие остаются «на сукне», но следуют по переменчивым траекториям. Вскоре после этого Анри Пуанкаре также нашел неповторяющиеся решения для орбит трех тел, связанных силой тяготения, таких как Земля с двумя Лунами, и опять-таки показал, что их орбиты нестабильны. Три тела вращаются вокруг друг друга по непрерывно изменяющимся орбитам, но не разлетаются. Математики попытались развить эту теорию применительно к движению многих тел (эргодическая теория) и применили ее к турбулентным потокам жидкостей и электрическим осцилляциям в радиосхемах. Начиная с 1950-х теория хаоса получила быстрое развитие, поскольку обнаруживались все новые хаотичные системы, а появившиеся тогда компьютеры упростили расчеты. Один из первых компьютеров, ENIAC, использовался для прогнозирования погоды и исследования хаоса.

Хаотическое поведение широко распространено в природе. Хаос, помимо его воздействия на погоду и потоки жидкостей, проявляет себя в поведении систем многих тел, в том числе и в планетарных системах. У Нептуна больше дюжины спутников. И вместо того, чтобы год за годом обращаться по одним и тем же орбитам, они, словно рикошетом, переходят с одной нестабильной орбиты на другую. Некоторые ученые считают, что упорядоченность нашей Солнечной системы в конечном счете обязана своим происхождением хаосу. Если миллиарды лет назад в гигантской бильярдной системе участвовали не только нынешние наши планеты, но и другие, орбиты их перетасовывались до тех пор, пока нестабильные тела не вылетели за пределы системы, оставив только стабильные — те, какие мы наблюдаем ныне.

**«Каждый, кто плыл на этом корабле, погиб! Гарри, который мог спасти их, там не было, потому что не было тебя, чтобы спасти Гарри! Понимаешь, Джордж: твоя жизнь и вправду прекрасна. Понимаешь, какой это было бы ошибкой — выбросить ее на помойку?»**

**«Эта прекрасная жизнь», 1946**

**В сухом остатке  
Хаос упорядочен**

# 13 Уравнение Бернулли

Уравнение Бернулли определяет связь между скоростью текущей жидкости и давлением. Оно управляет полетами самолетов, описывает течение крови по сосудам и впрыскивание горючего в двигателя автомобилей. Быстро текущие жидкости создают низкое давление, чем и объясняется подъемная сила, действующая на крыло самолета, или сужение струи бьющей из крана воды. Используя этот эффект для измерения кровяного давления, Даниил Бернулли вводил трубочки в вены пациентов.

Когда вы открываете водопроводный кран, из него течет струя, сечение которой меньше сечения крана. Почему? И какое отношение имеет это к самолетам и пластическим операциям на сосудах?

Голландский физик и врач Даниил Бернулли понял, что движение воды приводит к уменьшению ее давления. Чем быстрее вода течет, тем ниже давление. Представьте себе расположенную горизонтально прозрачную стеклянную трубку, через которую прокачивается вода. Вы можете измерить давление в трубке, вертикально вставив в нее другую, тоже прозрачную, но очень тонкую, капиллярную, и посмотрев, как меняется в последней высота воды. Если давление в первой трубке повышается, уровень воды во второй возрастает. Если давление понижается, уровень падает.

Когда Бернулли увеличивал скорость течения воды в горизонтальной трубке, давление в вертикальном капилляре падало — пропорционально квадрату скорости воды. Стало быть, любая текущая жидкость обладает давлением более низким, чем неподвижная.

Давление в воде, вытекающей из крана, ниже давления окружающего воздуха, потому ее струя и сужается. И применим этот закон к любой жидкости — от воды до воздуха.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1738**

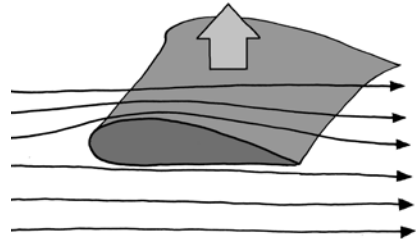
Бернулли устанавливает, что  
увеличение скорости жидкости  
уменьшает ее давление

**Кровоток** Медик по образованию, Бернулли изучал протекание крови по телу человека и изобрел инструмент, который позволял измерять кровяное давление. Введенная в кровеносный сосуд капиллярная трубка почти два столетия использовалась для измерения кровяного давления живых пациентов. Надо полагать, изобретение способа не столь инвазивного стало большим облегчением для всех причастных к таким измерениям лиц.

Совершенно как вода в трубке, кровь в артерии откачивается из сердца посредством установления градиента давления по всей длине сосуда. Если артерия сужается, скорость крови, проходящей узкое место, возрастает согласно уравнению Бернулли. Когда сосуд сужается вдвое, скорость протекающей по нему крови возрастает в четыре (два в квадрате) раза. Это убыстрение кровотока в ограниченных областях может приводить к проблемам. Во-первых, если скорость потока крови достаточно высока, он может стать турбулентным, вихревым, в нем появятся подобия водоворотов. Турбулентность вблизи сердца порождает в нем шумы — характерные звуки, которые умеют различать врачи. Кроме того, падение давления в ограниченной области может приводить к стягиванию мягких стенок сосудов, а это усугубит проблему еще сильнее. Если артерию расширить посредством пластической операции (ангиопластика), объем потока увеличится и все снова будет хорошо.

**Подъемная сила** Падение давления с увеличением скорости потока имеет и другие серьезные последствия. Самолеты летают потому, что воздух, обтекающий их крылья, создает перепад давления. Обычно форма крыла такова, что верхняя его часть изогнута больше нижней. Поскольку по верхней воздушной поверхности приходится проходить более длинный путь, воздух движется по ней быстрее, чем по нижней части, и потому давление здесь меньше, чем под крылом. Эта разница давлений создает подъемную силу, которая и позволяет самолету держаться в воздухе. Однако тяжелым самолетам приходится двигаться быстрее, чтобы получить перепад давлений, создающий подъемную силу, достаточную для отрыва от взлетной полосы.

Подобный же эффект используется для впрыскивания топлива из карбюратора в двигатель автомобиля. Специальное сопло, именуемое «трубкой Вентури» (широкая трубка, суженная в середине), создает низкое давление воздуха, задерживая, а следом высвобождая поток, который всасывает топливо и затем доставляет в двигатель рабочую смесь — топлива с воздухом.



1896

Изобретается неинвазивный метод измерения кровяного давления

1903

Вдохновленные Бернулли братья Райт изобретают крыло, которое позволяет им поднять в воздух первый аэроплан

### Даниил Бернулли, 1700–1782

Выполняя желание своего отца, голландский физик Даниил Бернулли выучился на врача, однако подлинная его любовь принадлежала математике. Отец Даниила, Иоганн, как раз математиком и был, но пытался убедить сына не следовать по его стопам и соперничал с ним на протяжении всей карьеры Даниила. Бернулли выучился в Базеле на врача, однако в 1724 году стал профессором математики в Санкт-Петербурге. Изучая совместно с математиком Леонардом Эйлером поведение жидкостей, он установил связь между скоростью и давлением посредством экспериментов с трубками, которые врачи использовали для измерения кровяного давления, вводя их в артерии. Бернулли понял, что связь скорости протекания и давления

жидкости определяется законом сохранения энергии, и показал, что если скорость увеличивается, то давление падает.

В 1733 году Даниил получил пост в Базеле, однако Иоганн проникся завистью к достижениям сына. Мысль о том, что ему придется работать на одном факультете с Даниилом, была настолько ненавистна Иоганну, что он даже выгнал сына из своего дома. Несмотря на все это, Даниил посвятил ему свою книгу «Гидродинамика», написанную в 1734 году, но опубликованную только в 1738-м. Однако Бернулли-старший присвоил идеи сына, опубликовав вскоре схожую книгу под названием «Гидравлика». Огорченный этим плагиатом, Даниил вернулся к медицине и оставался верен ей до конца.

**Сохранение** Даниил Бернулли пришел к своему открытию, размышляя о применимости закона сохранения энергии к текучим средам. Текучие среды, в том числе жидкости и воздух, — это непрерывные субстанции, обладающие способностью к постоянной деформации. Однако они должны подчиняться основным законам сохранения — и не только энергии, но также массы и количества движения. Поскольку любая движущаяся текучая среда перераспределяет, в сущности говоря, свои атомы, последние должны следовать выведенным Ньютоном и другими законам движения. При описании какой угодно текучей среды нельзя говорить о создании и уничтожении атомов — только об их движении, — поэтому необходимо учитывать и столкновения атомов друг с другом, при которых изменение их скоростей предсказывается законом сохранения количества движения. Кроме того, суммарная энергия всех частиц текучей среды должна оставаться постоянной, энергия может перераспределяться только внутри системы.

Эти законы физики используются ныне для моделирования поведения самых разных текучих сред — воздушных потоков в атмосфере (прогнозирование погоды), океанических течений, циркуляции газа в звездах и галактиках и протекания жидкостей в наших телах. Предсказание погоды основывается на компьютерном моделировании



совместного движения множества атомов в сочетании с термодинамикой, позволяющей учитывать тепловые изменения при движении атомов и региональные изменения плотности, температуры и давления воздуха. И здесь изменения давления и скоростей взаимосвязаны, они заставляют ветра дуть из областей высокого давления в области низкого. Те же идеи использовались при моделировании пути урагана «Катрина», летевшего в 2005 году к побережью Америки.

Законы сохранения получили свое воплощение в системе других уравнений, названных в честь ученых, которые их вывели, — уравнения Навье—Стокса. Они описывают эффекты, возникающие в жидкости вследствие ее вязкости и липкости и создаваемые силами, которые действуют между образующими жидкость молекулами. Опираясь скорее законами сохранения, чем абсолютно точными предсказаниями, эти уравнения позволяют отследить изменения и циркуляцию частиц жидкости в среднем, не используя полное число атомов.

Уравнения Навье—Стокса хоть и являются достаточно детализированными для описания поведения многих сложных систем — таких как климатические явления, в том числе и осцилляции Эль-Ниньо и ураганы, — однако они не годятся для описания потоков с высокой турбулентностью — водопадов или струй фонтана. Турбулентность — это случайное движение взбудораженной воды, для которого характерны нестабильность и образование водоворотов. Она возникает, когда скорость потока становится очень высокой, а сам он — нестабильным. Поскольку турбулентность очень трудна для математического описания, ученых, которые смогут вывести новые уравнения для описания этих крайних ситуаций, все еще ждут большие денежные премии.

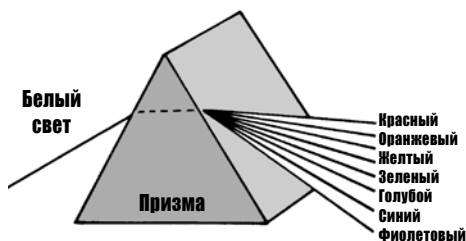
**«Летательные аппараты более тяжелые, чем воздух, невозможны. У меня нет ни малейшей молекулы веры в какие-либо полеты, отличные от тех, которые совершают воздушные шары, как нет и ожидания достойных результатов от испытаний, о которых мы постоянно слышим»**

**Лорд Кельвин, 1895**

**В сухом остатке**  
**Артерии и аэродинамика**

# 14 НЬЮТОНОВСКАЯ ТЕОРИЯ ЦВЕТА

Все мы дивимся красоте радуги, — Исаак Ньютон объяснил, как она образуется. Пропустив белый свет сквозь стеклянную призму, он обнаружил, что свет разделяется на лучи радужных тонов, и доказал: эти цвета присутствуют в белом свете, а не создаются призмой. В то время ньютоновская теория цвета стала предметом сварливых нападок, однако с тех пор она оказала влияние на многие поколения художников и ученых.



Яркий белый луч света входит в призму, а выходит из нее лучами радужных цветов. Точно так же появляется и небесная радуга — солнечный свет расщепляется каплями воды на знакомые всем радужные тона: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый.

**Все в одном коктейле** В 1660-х, экспериментируя у себя дома со светом и призмами,

Исаак Ньютон доказал, что различные цвета могут комбинироваться, создавая белый. Цвета — это скорее базовые единицы, чем результат воздействия стекла призмы, как считалось раньше. Ньютон отделил красный и голубой лучи и показал, что, будучи пропущенными через другие призмы, они больше не расщепляются.

Ньютоновская теория света, сегодня столь известная, в его время была принята в штыки. Другие ученые громогласно выступали против нее, предпочитая верить в то, что цвета возникают как сочетания белого света и тьмы, что они подобны теням. Особенно яростным противником Ньютона был его столь же прославленный современник Роберт Гук. Эти двое на протяжении всей жизни вели публичные споры о теории цвета. Гук считал цвет своего рода зрительным феноменом: посмотри на белый сквозь цветное стекло, вот и получится свет другого оттенка. В подкрепление своих воззрений он

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
1672

Ньютон объясняет,  
как возникает радуга



приводил множество примеров необычных световых эффектов, существующих в повседневной жизни, и критиковал Ньютона за скудость его экспериментальной базы.

Ньютон понял также, что предметы, находящиеся в освещенной комнате, выглядят окрашенными потому, что они рассеивают или отражают свет определенного цвета, а не потому, что цвет является неким качеством того или иного предмета. Красная софа отражает преимущественно красный свет, зеленый стол отражает зеленый. Бирюзовая подушка отражает голубой и светло-желтый. Другие цвета возникают в результате смешения этих основных типов света.

**Световые волны** Понимание цвета было для Ньютона средством проникновения в физику самого света. Проведя дальнейшие эксперименты, он пришел к заключению, что свет во многих отношениях ведет себя как водяные волны. Свет огибает препятствия, как морские волны огибают пирс. Лучи света можно также соединять, усиливая или ослабляя их яркость, что происходит и при наложении одних волн на другие. Волны воды — это крупномасштабные движения ее молекул, поэтому Ньютон счел, что световые волны также являются, по сути дела, подобием ряби, создаваемой мельчайшими частицами света, или «корпускулами», имеющими размеры меньше атомных. Конечно, Ньютон не знал того, что было открыто столетия спустя, а именно: волны света суть волны электромагнитные — волны спаренных электрического и магнитного полей, а не колебания твердых частиц. После открытия электромагнитной природы света корпускулярная идея Ньютона была отправлена в отставку. Однако она воскресла в новой форме, когда Эйнштейн показал, что свет иногда может вести себя как поток частиц, которые переносят энергию, но не обладают массой.

Волновое движение существует во многих обличьях. Есть два основных типа волн: продольные и поперечные. Продольные волны, или волны сжатия, возникают, когда сила, порождающая волну, действует в направлении распространения волны, создавая гребни высокого и низкого давления. Например, звуковые волны, порождаемые вибрирующей кожей барабана, являются продольными, как и волны, которые прокатываются по сороконожке, — она ползет, поджимая лапки и вытягивая. С другой стороны, водные и световые волны являются поперечными, создающее их начальное возмущение действует под прямым углом к направлению движения волн. Если вы возьметесь за конец не натянутой веревки и покачаете его из стороны в сторону, по ней побежит поперечная волна — несмотря на то, что рука ваша

**«Был этот мир  
извечной тьмой окутан.  
«Да будет свет!» —  
И вот явился Ньютон»**

**Александр Поуп, 1727**  
(эпитафия Ньютону)

1810

Гете публикует трактат о свете

1905

Эйнштейн показывает, что при определенных обстоятельствах свет может вести себя как частицы

совершает движения в перпендикулярном веревке направлении. Точно так же ползущая змея создает поперечную волну, раскачиваясь из стороны в сторону, и это толкает ее вперед. Волны, распространяющиеся по воде, также поперечны, поскольку отдельные молекулы воды просто поднимаются и опускаются, между тем как волна уходит к горизонту. В отличие от них поперечная световая волна возникает вследствие изменения напряженностей электрического и магнитного полей, направленных перпендикулярно к направлению распространения волны.

**Вдоль спектра** Различные цвета света отражают различия в длинах соответствующих электромагнитных волн. Длина волны измеряется как расстояние между ее последовательными гребнями. Проходя сквозь призму, белый цвет разделяется на лучи многих оттенков, поскольку каждому соответствует своя длина волны, и оттого стекло отклоняет их под разными углами. Угол отклонения зависит от длины волны — для красного света он минимален, для синего максимален, что и создает последовательность радужных красок. Спектр видимого света возникает в порядке длин волн — наибольшая длина у красного, наименьшая у синего.

## Цветовой круг

Ньютон определил порядок следования цветов радуги — от красного к синему — и нанес их на круг, позволявший ему показывать, как комбинируются цвета. Первичные — красный, желтый и голубой, — соединяемые в различных пропорциях, способны создавать все остальные цвета. Дополнительные цвета, такие как синий и оранжевый, располагались друг против друга. Ньютоновская теория цвета и в особенности его цветовой круг заинтересовали многих художников, поскольку давали им возможность изображать контрастирующие оттенки и эффекты освещения. Дополнительные цвета позволяли добиваться максимального контраста и были также полезны для изображения теней.

Что лежит по краям радуги? Видимый свет — это всего лишь часть электромагнитного спектра. Для нас он важен потому, что наши глаза приспособились использовать именно эту часть спектра. Поскольку длины волн видимого света примерно отвечают размерам атомов и молекул (сотни миллиардных метра), взаимодействие света и атомов вещества имеет значительные масштабы. В ходе эволюции наши глаза обрели способность использовать видимый свет, поскольку он очень чувствителен к атомной структуре. Ньютона сильно интересовали устройство и работа наших глаз, он даже вводил «шпильку» между собственным глазным яблоком и костью, чтобы узнать, как нажим на глазное яблоко сказывается на его восприятии цвета.

За красным светом идет инфракрасный с длинами волн в миллионные доли метра. Инфракрасные лучи переносят солнечное тепло, кроме того, их способны собирать приборы ночного видения, позволяющие «видеть» тепло, которое исходит от тел. Еще длиннее микроволны (длины волн от миллиметров до сантиметров) и радиоволны (метр и больше). Микроволны используются в микроволновых печах, они раскручивают содержащиеся в продуктах молекулы воды, нагревая ее. На другом конце спектра, за синим цветом, находится ультрафиолетовый. Он излучается Солнцем и может повреждать нашу кожу, хотя большая его часть поглощается озоновым слоем атмосферы Земли. Еще более короткая длина волны у лучей рентгеновских — они используются в больницах, поскольку способны проходить сквозь ткани человеческого тела, — наименьшими длинами волн обладают гамма-лучи.

**Развитие идей Ньютона** Ньютон объяснил природу света, однако философов и художников продолжало интересовать наше восприятие цвета. В XIX веке немецкий энциклопедист Иоганн Вольфганг фон Гете исследовал интерпретацию нашим глазом и мозгом наложенных бок о бок красок. Гете добавил в цветовой круг Ньютона (см. вставку) пурпурный цвет и отметил, что тень освещенного объекта нередко окрашивается в цвет, противоположный его собственному, — красный объект отбрасывает синеватую тень. Усовершенствованный Гете цветовой круг и поныне остается для художников и дизайнеров предпочтительным выбором.

В сухом остатке  
За радугой

# 15 Принцип Гюйгенса

**Если вы бросите в пруд камень, он породит на поверхности воды зыбь в виде расширяющегося круга. А почему он расширяется? И как можете вы предсказать его поведение — будет ли он обтекать препятствия, скажем древесный пень, отразится ли от берега пруда? Принцип Гюйгенса — инструмент, позволяющий понять поведение волны, и основан он на том, что каждая точка волнового фронта представляет собой новый источник зыби.**

Голландский физик Христиан Гюйгенс придумал практический способ предсказания распространения волн. Допустим, вы бросили камушек в озеро и результатом стала кольцеобразная зыбь. Если представить себе, что в некий момент времени вам удалось заставить один такой круг замереть, то каждую точку кольцеобразной волны можно будет мыслить как источник новых круговых волн, свойства которых в точности отвечают свойствам замершей волны. Все выглядит так, точно в воду одновременно роняют круг камушков, совпадающий по размерам с кругом первой, замершей волны. Этот следующий набор возмущений расширяет первую волну, и новое геометрическое место точек содержит начальные точки другого набора источников распространения волновой энергии. Многократное повторение этого принципа позволяет проследить эволюцию волны.

**Шаг за шагом** Утверждение о том, что каждая точка волнового фронта ведет себя как новый источник волновой энергии, имеющей ту же частоту и фазу, называется «принципом Гюйгенса». Частота волны — это число ее циклов за определенный период времени, а фаза волны определяет, в какой точке цикла вы находитесь. Например, все гребни волны имеют одну и ту же фазу, а все ее низшие точки находятся на расстоянии половины цикла от гребней. Если представить себе

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1655**

Гюйгенс открывает Титан

**1678**

Трактат Гюйгенса  
о волновой природе света

### Христиан Гюйгенс, 1629–1695

Сын голландского дипломата Христиан Гюйгенс был аристократом-ученым, который поддерживал обширные связи с учеными и философами Европы XVII столетия, в том числе с такими знаменитостями, как Ньютон, Гук и Декарт. Первые публикации Гюйгенса были посвящены проблемам математики, но помимо этого он занимался также изучением Сатурна. Он был ученым-практиком, запатентовавшим первые маятниковые часы и пытавшимся создать часы судовые, которые позволяли бы

определять в море долготу. Гюйгенс разъезжал по Европе, проводя особенно много времени в Париже и Лондоне, встречаясь с выдающимися учеными и работая с ними над проблемами маятника, кругового движения, механики и оптики. С Ньютоном Гюйгенс работал над проблемой центробежной силы, однако ньютоновскую теорию тяготения с ее концепцией дальнего действия считал «абсурдной». В 1768 году Гюйгенс опубликовал свой трактат по волновой теории света.

океанскую волну, расстояние между двумя ее гребнями, именуемое «длиной волны», может составлять 100 метров. Ее частота, то есть число длин волн, проходящих через некоторую точку за одну секунду, может составлять одну, равную 100 метрам, длину волны за 60 секунд, то есть один цикл в минуту. Самые быстрые океанские волны — это цунами, скорость которых достигает 800 километров в час — как у реактивного самолета. Иногда эта скорость падает до десятков километров в час, а затем возрастает, когда волна растекается по побережью.

Чтобы изобразить распространение волны, можно снова и снова — по мере того как она встречается с препятствиями или другими волнами — использовать принцип Гюйгенса. Если изобразить положение волнового фронта на листке бумаги, то последующие его положения можно описать, рисуя с помощью циркуля круги с центрами в точках волнового фронта и проводя линию, соединяющую крайние оконечности эти кругов, — она и будет изображением следующего положения волны.

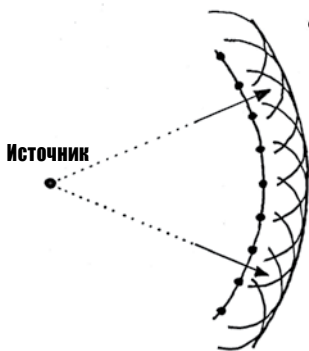
Простой подход Гюйгенса позволяет описывать поведение волн в самых разных обстоятельствах. Линейная волна так и остается, распространяясь, линейной, поскольку создаваемая ею по всей ее длине мелкая зыбь складывается, образуя впереди нее новый прямой волновой фронт. Однако, понаблюдав за несколькими линейными волнами, проходящими через отверстие в стене гавани, вы увидите, что

**1873**

Уравнения Максвелла показывают, что свет — это электромагнитная волна

**2005**

Космический зонд «Гюйгенс» приземляется на Титане



они становятся дуговидными. Через отверстие проходит только очень короткий отрезок прямой волны, при этом сам он остается неизменным, однако на краях его, где в соответствии с принципом Гюйгенса возникает новая круговая рябь, образуются дуги. Если отверстие мало в сравнении с расстоянием между волнами, округлые края становятся в прошедшей через него волне главными и сама она выглядит почти полукруглой. Такое распространение волновой энергии от краев отверстия называется «дифракцией».

В 2004 году порожденное сильным землетрясением на Суматре катастрофическое цунами прокатилось по всему Индийскому океану. В некоторых местах его сила уменьшалась, поскольку при прохождении через цепочки островов часть энергии цунами рассеивалась благодаря дифракции.

**Вы верите своим ушам?** Принцип Гюйгенса объясняет также, почему, когда вы кричите что-то людям, находящимся в соседней комнате, они слышат вас так, точно

вы стоите в проеме соединяющей комнаты двери. Согласно Гюйгенсу, когда звуковые волны доходят до дверного проема, происходит то же, что с отверстием в стене гавани: в проеме образуется новый набор точечных источников волновой энергии. И до слушающих вас людей доходят волны, которые генерируются в дверном проеме, а прежняя история волн утрачивается.

Подобным же образом, понаблюдав за круговой волной, приближающейся к берегу пруда, вы увидите, что отраженная берегом волна оказывается тоже круговой, но инвертированной. Первая достигающая берега точка волнового фронта становится новым источником возмущения воды, и с нее начинается обратное распространение круговой волны. Это отражение волн также можно описать с помощью принципа Гюйгенса.

## «Гюйгенс» на Титане

14 января 2005 года космический зонд «Гюйгенс» после семи лет полета опустился на Титан. Заключенный в защитную оболочку, имевшую в поперечнике несколько метров, зонд «Гюйгенс» выполнил, опускаясь сквозь атмосферу Титана на его ледяную поверхность, целый ряд экспериментов: определил скорость ветра, атмосферное давление, температуру и структуру поверхности. Мир Титана причудлив — в атмосфере и на поверхности присутствует жидкий метан. Некоторые считают, что на нем могут существовать примитивные формы жизни — питающиеся метаном бактерии. «Гюйгенс» был первым космическим зондом, совершившим посадку на небесное тело, находящееся во внешней Солнечной системе.



Когда океанские волны достигают мелководья (например, вблизи берега), их скорость меняется и волновые фронты прогибаются от мели вовнутрь. Гюйгенс описал эту «рефракцию», изменив радиус волновой зыби таким образом, что волны более медленные стали создавать круги поменьше. Медленная зыбь отстает от более быстрой, и новый волновой фронт распространяется под углом к исходному.

Принцип Гюйгенса предсказывает также и одно несбыточное явление, а именно: если все точки мелкой круговой ряби являются источниками волновой энергии, они должны создавать — помимо волны, распространяющейся вперед, — также и волну, которая распространяется назад. Так почему же волны только вперед и движутся? Гюйгенс ответить на этот вопрос не смог и просто предположил, что волновая энергия распространяется вовне, а попятное движение игнорируется. То есть принцип Гюйгенса представляет собой не более чем полезный инструмент, позволяющий предсказывать распространение волн, но отнюдь не закон, который все объясняет.

**Кольца Сатурна** Гюйгенс интересовался не только распространением волн, он еще и открыл кольца Сатурна, первым показав, что эту планету опоясывает уплощенный диск, а не цепочка спутников или изменяющаяся экваториальная выпуклость. Он пришел к выводу, что тот же физический закон — ньютоновский закон тяготения, — что описывает орбиты спутников планет, применим и к телам намного меньшим, также движущимся по круговым орбитам. В 1665 году Гюйгенс открыл самый большой из спутников Сатурна, Титан. Ровно 350 лет спустя Сатурна достиг космический корабль «Кассини», несший в себе небольшую капсулу, названную именем Гюйгенса, и она спустилась сквозь облака атмосферы Титана на его поверхность, состоящую из замерзшего метана. На Титане имеются континенты, песчаные дюны, озера и, возможно, реки — все это из твердых и жидких метана и этана. Гюйгенса наверняка изумила бы мысль о том, что настанет день, когда носящий его имя корабль достигнет этого далекого мира, а носящий его имя принцип будет использоваться для моделирования обнаруженных там волн.

**Каждый человек, вставая на защиту идеала... создает крошечные волны надежды, и они, соединяясь с другими волнами, распространяющимися из миллиона разных центров энергии и отваги, образуют поток, способный смести даже самые мощные стены угнетения и антагонизма**

Роберт Кеннеди, 1966

**В сухом остатке  
Волны распространяются**



# 16 Закон Снеллиуса

**Почему соломинка в стакане воды выглядит погнутой? Просто в воздухе и в воде свет распространяется с разными скоростями и световые лучи преломляются. Закон Снеллиуса, описывающий это преломление, объясняет возникновение миражных луж на горячей дороге и то, почему люди, плавающие в бассейне, кажутся коротконожками. Сегодня этот закон помогает создавать хитроумные материалы, которые выглядят невидимыми.**

Когда луч света пересекает границу двух сред, в которых он распространяется с разными скоростями, например границу между воздухом и водой, его лучи преломляются. Это явление называется «рефракцией». Закон Снеллиуса описывает величину этого преломления для различных сред, а назван он так в честь голландского математика XVII века Виллеброрда Снеллиуса, хотя сам Снеллиус так его и не опубликовал. Его называют еще «законом Снеллиуса—Декарта», поскольку Рене Декарт опубликовал материалы Снеллиуса в 1637 году. Такое поведение света было хорошо известно и описывалось еще в X веке, однако объяснение оно получило лишь столетия спустя.

В более плотных средах — таких как вода или стекло в сравнении с воздухом — распространение света замедляется. Поэтому солнечный луч, достигая поверхности воды в плавательном бассейне, отклоняется в сторону дна. Отраженные лучи достигают наших глаз под меньшим углом, отклоняясь, в свой черед, в другую сторону, но мы-то предполагаем, что они идут к нам по прямой, поэтому ноги стоящего в бассейне человека выглядят укороченными. Подобным же образом на раскаленном шоссе возникает миражная лужа. Падающий с неба свет преломляется, чтобы скользнуть вдоль поверхности шоссе, потому что скорость его распространения изменяется в слое горячего воздуха.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**984**

Ибн-Сал пишет о рефракции и линзах

**1621**

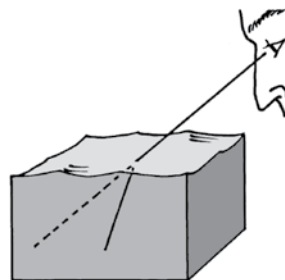
Снеллиус открывает закон рефракции

**1637**

Декарт публикует аналогичный закон

Горячий воздух не так плотен, как прохладный, свет уклоняется от вертикали, а мы видим отражение неба в асфальте, похожее на лужу воды.

Угол, под которым преломляется луч света, зависит от отношения скоростей его распространения в двух средах — строго говоря, отношение скоростей определяется отношением синусов углов падения света (измеренных от вертикали). Поэтому, когда свет переходит из воздуха в воду или в иную более плотную среду, луч его преломляется вовнутрь, а путь становится более крутым.



**Коэффициент преломления** В вакууме (например, в пустом космосе) свет распространяется с фантастической скоростью — 300 миллионов метров в секунду. Отношение скорости его распространения в среде более плотной, например в стекле, к скорости распространения в вакууме называется «коэффициентом преломления среды». Вакуум имеет, по определению, коэффициент преломления, равный 1; среда с коэффициентом преломления, равным 2, уменьшает скорость света до половины его скорости в вакууме. Высокий коэффициент преломления среды означает, что луч света, проходя через нее, сильно переламывается.

Коэффициент преломления — это свойство самой среды. Можно создавать вещества (среды), обладающие определенными коэффициентами преломления, что бывает весьма полезно (например, в производстве стекол для очков, позволяющих избавляться от проблем со зрением).

Мощность линз и призм зависит от их коэффициента преломления: чем мощнее линзы, тем выше коэффициент преломления.

Преломление происходит с любыми волнами, не только со светом. Скорость океанских волн спадает с увеличением глубины, имитируя изменение коэффициента преломления. Вследствие этого волны движутся под углом к мелководью, изгибаясь по мере приближения к нему, — буруны всегда идут параллельно наклонным отмелям.

## Сладко-сладко

Коэффициент преломления оказывается полезным инструментом в виноделии и производстве фруктовых соков. Виноделы используют рефрактометр (измеритель коэффициента преломления) для измерения содержания сахара в виноградном соке — прежде, чем обратить его в вино. Растворенный сахар увеличивает коэффициент преломления сока и показывает также, насколько крепким может получиться вино.

1990

Начинается разработка метаматериалов

## Всплеск

Плавательные бассейны — одна из любимых тем британского художника Дэвида Хокни. Он не только с наслаждением изображает, воспроизводя оптические эффекты, скользящие под водой тела людей, которые купаются солнечными днями в бассейне его калифорнийского дома, но и наделал в 2001 году шума в мире искусства, высказав предположение, что некоторые знаменитые художники начиная с XV столетия использовали при создании своих полотен линзы. Простые оптические устройства могут проецировать какую-либо сцену на холст, а художнику останется только обвести контуры и оживить картину красками. Вглядываясь в полотна старых мастеров, в том числе Энгра и Караваджо, Хокни обнаружил наводящую на размышления точность геометрических фигур.

**Полное внутреннее отражение** Иногда, если луч света, проходя через стеклянную пластину, падает на ее границу с воздухом под слишком большим углом скольжения, луч не выходит в воздух, но отражается от внутренней поверхности стекла. Это явление называется «полным внутренним отражением», поскольку весь свет остается в стекле. Критический угол, при котором это происходит, определяется отношением коэффициентов преломления двух сред. Это явление возникает только при прохождении волн из среды с более высоким коэффициентом преломления в среду с более низким, например из стекла в воздух.

**Принцип наименьшего времени Ферма** Из закона Снеллиуса вытекает принцип наименьшего времени Ферма, который постулирует, что луч света

выбирает в любой среде путь, который он может пройти за минимальное время. Поэтому, проходя через совокупность сред с различными коэффициентами преломления, световой луч выберет путь самый быстрый, отдав предпочтение среде с малым коэффициентом преломления. По существу, это способ определения того, что представляет собой пучок света, и его можно вывести из принципа Гюйгенса, заметив, что лучи, проходящие по самым быстрым путям, имеют тенденцию усиливать друг друга и создавать световой пучок, тогда как лучи, следующие в самых разных направлениях, в среднем взаимно гасят друг друга. Математик Пьер Ферма выдвинул этот принцип в XVII веке, когда исследования оптики достигли пика своего развития.

**Метаматериалы** В настоящее время физики разрабатывают новый класс особых материалов, именуемых «метаматериалами», которые при облучении их светом и другими электромагнитными волнами ведут себя совершенно по-новому. Метаматериалы создаются так, что при освещении их внешний вид диктуется скорее физической структурой этих материалов, чем их химическим составом. Природным метаматериалом является опал, кристаллическая структура которого влияет на то, как его поверхность преломляет и отражает свет, создавая блики различных цветов.

### Пьер Ферма, 1601–1665

Пьер Ферма был тулузским юристом, занимавшимся математикой в свободное время. После того как он вступил в переписку со знаменитыми математиками Парижа, репутация его возросла, но опубликовать что-либо он так и не смог. Ферма поссорился с Рене Декартом из-за выдвинутой тем теории преломления, заявив, что Декарт «на ощупь движется в темноте». Декарт рассердился, однако Ферма оказался прав. Позже Ферма придал своей работе форму принципа наименьшего времени. Трудам Ферма помешала гражданская война во Франции

и эпидемия чумы. Ферма продолжал работать над теорией чисел. Его помнят прежде всего за «последнюю теорему Ферма», которая утверждает, что сумма двух кубов сама кубом быть не может (и так далее, для степеней более высоких). Ферма записал на полях книги, что нашел поистине замечательное доказательство своей теоремы, но здесь, на полях, слишком мало места, чтобы привести его. Утраченное доказательство Ферма ставило математиков в тупик на протяжении трех веков, пока британский математик Эндрю Уайлс не доказал ее в 1995 году.

В конце 1990-х были созданы метаматериалы с отрицательным коэффициентом преломления, в которых граница двух сред отклоняет луч света в противоположном обычному направлении. Если ваш друг войдет в бассейн, заполненный жидкостью с отрицательным коэффициентом преломления, то вы увидите не лицевую сторону его укороченных ног, а тыльную, да еще и спроецированную на лицевую сторону его тела. Материалы с отрицательным коэффициентом преломления можно использовать для создания «суперлинз», способных давать изображения куда более четкие, чем у самого лучшего стекла. В 2006 году физикам удалось получить метаматериал, получивший название «плаща-невидимки», поскольку он остается полностью невидимым для микроволн.

**В сухом остатке**  
**Свет выбирает**  
**кратчайший путь**

# 17 Закон Брэгга

**Двойную спираль молекулы ДНК обнаружили с помощью закона Брэгга. Этот закон объясняет, как волны, проходящие через упорядоченное твердое тело, усиливают друг друга и создают узор из ярких пятен, расстояние между которыми зависит от фиксированных расстояний между атомами и молекулами тела. Промеряя рисунок пятен, можно получить сведения о его кристаллической архитектуре.**

Если вы сидите сейчас в комнате, поднесите ладонь поближе к стене — и вы увидите ее резкую тень. А теперь немного отодвиньте ладонь от стены — очертания тени расплывутся. Происходит это потому, что свет, сталкиваясь с вашей ладонью, испытывает дифракцию. Лучи его огибают пальцы, размывая тень. И так ведут себя все волны. Волны воды рассеиваются на краях стен гавани, звуковые волны изгибаются, минуя край сцены концертного зала.

Дифракцию можно описать, используя принцип Гюйгенса, который предсказывает прохождение волны, рассматривая каждую точку волнового фронта как источник волновой энергии. Каждая точка создает сферическую волну, они складываются, определяя продвижение волны вперед. Если волновой фронт ограничен, сферические волны, возникающие на его краях, распространяются беспрепятственно. Это происходит, когда череда параллельных волн огибает препятствие наподобие вашей ладони или проходит сквозь отверстие — вход в гавань либо дверной проем.

**Рентгеновская кристаллография** Австралийский физик Уильям Лоренс Брэгг обнаружил, что дифракция возникает и при прохождении волн через кристаллы. Кристалл состоит из атомов, закрепленных в аккуратной решеточной структуре, с отстоящими друг

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1895**

Рентген открывает рентгеновские лучи

**1912**

Брэгг открывает закон дифракции



### Уильям Лоренс Брэгг, 1890–1971

Уильям Лоренс Брэгг родился в Аделаиде, в семье профессора математики и физики. Слетев в детстве с велосипеда и сломав руку, Брэгг-младший стал первым австралийцем, прошедшим медицинское рентгеновское обследование. Он изучал физику, а после окончания университета уехал с отцом в Англию. Там, в Кембридже, он и открыл закон дифракции рентгеновских лучей на кристаллах. Он обсуждал свои идеи с отцом и впоследствии очень расстраивался из-за того, что

многие полагали, будто закон был открыт отцом, а не им. И в Первую, и во Вторую мировую войну Брэгг служил в армии, работая над конструкцией эолокатора. А затем возвращался в Кембридж, где создал несколько небольших исследовательских групп. В конце своей карьеры Брэгг стал известным популяризатором науки, организовав в Лондонском королевском институте чтение лекций для школьников и регулярно появляясь на телевизионном экране.

от друга на определенные расстояния рядами и колоннами атомов. Брэгг пропускал сквозь кристаллы рентгеновские лучи и направлял их на экран. Лучи рассеивались на рядах атомов. Выходящие из кристалла лучи избирали определенные направления и не избирали других, создавая рисунок ярких пятен. В зависимости от типа используемых кристаллов рисунки получались разными.

Для обнаружения этого эффекта понадобились открытые в 1895 году немецким физиком Вильгельмом Рентгеном и названные его именем лучи, длина волны которых чрезвычайно мала — в тысячи раз меньше, чем у видимого света, и меньше расстояния между атомами кристалла. Таким образом, длина волны рентгеновских лучей достаточно мала, чтобы они проходили через кристаллическую решетку, претерпевая в ней сильную дифракцию.

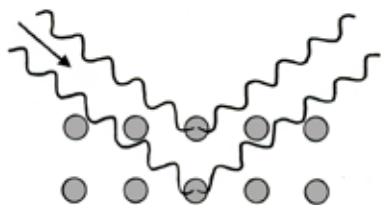
Самые яркие пятна на рентгенограмме возникают, когда лучи проходят через кристалл таким образом, что их волны становятся синфазными. Синфазные волны, высшие и низшие точки которых согласованы, могут соединяться, отчего их яркость будет возрастать, и создавать на фотопластине пятна. Волны, «сдвинутые по фазе», с рассогласованными высшими и низшими точками, гасят одна другую и световых

**Главное в науке не столько получение новых фактов, сколько способность по-новому осмысливать имеющиеся**

Уильям Брэгг, 1968

**1953**

С помощью рентгеновской кристаллографии открыта структура ДНК



пятен не порождают. Таким образом, на фотопластине возникает узор из ярких точек, расстояние между которыми позволяет определить расстояния между рядами атомов в кристалле. Этот эффект взаимного усиления и гашения волн называется «интерференцией».

Брэгг описал все это математически, рассмотрев две волны, одна из которых отражается от поверхности кристалла, а другая проникает в него ровно на глубину первого слоя атомов. Для того чтобы вторая волна стала синфазной и усилила первую, она должна пройти дополнительное расстояние, равное целому числу длин волн первой. Это дополнительное расстояние зависит от угла падения лучей и расстояния между слоями атомов. Закон Брэгга гласит, что дифракция возникает, когда периоды кристаллических решеток отвечают определенным длинам волн.

**Глубинная структура** Рентгеновская кристаллография широко используется для определения структуры новых материалов, а химики и биологи прибегают к ней, исследуя архитектуру молекул. В 1953 году с ее помощью была обнаружена двойная спираль молекулы ДНК, — как известно, идея спирали возникла у Фрэнсиса Крика и Джеймса Уотсона, когда они увидели полученный Розалиндой Франклин узор интерференции рентгеновских лучей, прошедших через ДНК, и поняли, что молекулы должны быть выстроены в двойную спираль.

## Двойная спираль ДНК

В 1950-х ученые ломали голову над структурой ДНК, одного из «кирпичиков» жизни. В 1953-м британские физики Джеймс Уотсон и Фрэнсис Крик опубликовали результаты своих исследований, из которых следовало, что молекула ДНК выглядит как двойная спираль, и это стало серьезным шагом вперед. Они признали, что многим обязаны ученым из Лондонского королевского колледжа, Морису Уилкинсу и Розалинде Франклин, получившим с использованием закона Брэгга рентгеновские кристаллографические фотографии ДНК. Франклин сделала

на редкость четкие снимки интерференционного узора ярких пятен, которые и позволили в конечном счете установить структуру ДНК. Крик, Уотсон и Уилкинс были удостоены за эту работу Нобелевской премии, — но не умершая молодой Франклин. Многие считают, что ее роль в этом открытии была принижена, возможно, из-за сексистских взглядов того времени. Кроме того, результаты Франклин могли быть переданы Уотсону и Крику без ее ведома. Ныне вклад Розалинды Франклин в это открытие является общепризнанным.



## Вильгельм Рентген, 1845–1923

Вильгельм Рентген родился в Нижнерейнской области Германии, но еще в детские его годы родители Рентгена перебрались в Нидерланды. Он изучал физику в Утрехте и Цюрихе, работал во многих университетах, возглавлял кафедры физики в университетах Вюрцбурга и Мюнхена. Основными предметами его исследований были теплота и электромагнетизм, однако прославился он совершенным им в 1895 году открытием рентгеновского излучения. Пропуская ток через

разреженный газ, он заметил, что при этом начинает светиться покрытый химикалиями экран, даже если эксперимент проводится в полной темноте. Обнаруженные им лучи проходили через многие материалы, включая и положенную на фотопластинку ладонь жены Рентгена. Он назвал эти лучи X-лучами, поскольку происхождение их оставалось непонятным. Впоследствии было показано, что они суть такие же электромагнитные волны, как свет, но только частоту имеют куда более высокую.

Открытие рентгеновских лучей и кристаллографии впервые дало физикам инструменты, позволяющие проникать в глубинную структуру материи и даже внутрь человеческого тела. Многие нынешние методы медицинской интраскопии основаны на аналогичных физических процессах. Компьютерная томография собирает многочисленные рентгеновские сечения тела в реалистическое внутреннее изображение; ультразвуковое исследование позволяет получать высокочастотное эхо от внутренних органов тела; магнитно-резонансная томография (МРТ) сканирует воду, присутствующую в тканях тела, выявляя вибрации молекул, создаваемые сильным магнитным полем; позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) позволяет наблюдать за распространением по телу радиоактивного препарата. За разработку этих инструментов и врачам, и пациентам следует благодарить Брэгга.

В математической форме закон Брэгга выглядит так:

$$2d \sin \theta = n\lambda,$$

где  $d$  — расстояние между слоями атомов,  
 $\theta$  — угол падения света,  
 $n$  — целое число,  
 $\lambda$  — длина волны света.

**В сухом остатке**  
**Узор из пятен**

# 18 Дифракция Фраунгофера

**Почему нам никогда не удастся получить совершенный по качеству фотоснимок? Почему несовершенно и наше зрение? Даже самые маленькие пятнышки становятся расплывчатыми, оттого что свет, проходя через зрачок или отверстие диафрагмы фотоаппарата, размывается. Такое размывание световых лучей, приходящих к нам от далекого пейзажа, описывается дифракцией Фраунгофера.**

Глядя на далекое судно, идущее вдоль линии горизонта, прочесть его название невозможно. Вы можете сделать это с помощью бинокля, но почему же наши глаза обладают столь ограниченным разрешением? Причина состоит в размере наших зрачков (в их апертурах). Чтобы они пропускали больше света, который подействует на чувствительные элементы глаз, их нужно открыть пошире, однако чем шире они открываются, тем сильнее расплываются входящие в них световые волны.

Световые волны, проходящие через хрусталик глаза, могут поступать по самым разным направлениям. Чем шире апертура, тем больше направлений, по которым приходят лучи. Как и в случае дифракции Брэгга, различные световые пути интерферируют в зависимости от того, согласованы или рассогласованы их фазы. Большая часть синфазных лучей проходит сквозь хрусталик, образуя ясное и яркое центральное пятно. Однако диаметр пятна ограничен — соседствующие лучи гасят друг друга, в итоге образуются чередующиеся темные и светлые полосы. Наиболее тонкие детали, которые способен различить наш глаз, именно диаметром центрального пятна и определяются.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1801**

Томас Юнг ставит опыт с двумя прорезями

**1814**

Фраунгофер изобретает спектроскоп

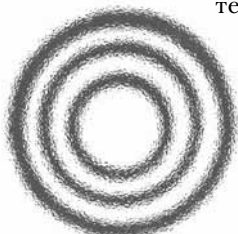
**Дальнее поле** Дифракция Фраунгофера, названная так в честь выдающегося немецкого производителя линз Йозефа фон Фраунгофера, описывает расплывание изображений, которые получаются, когда световые лучи, проходящие через какую-то апертуру либо хрусталик глаза, параллельны друг другу. Дифракция Фраунгофера, называемая также «дифракцией дальнего поля», возникает, когда через линзы проходит свет от удаленного источника (например, от Солнца или звезд). Этими линзами могут быть наши глаза, или объектив фотоаппарата, или труба телескопа. И в случае глаза, и в случае фотоаппарата эффекты дифракции размывают конечное изображение. Следовательно, существует естественный предел четкости изображения, получаемого с помощью любой оптической системы, — «дифракционный предел». Значение этого предела определяется длиной волны света, а кроме того, он обратно пропорционален диаметру апертуры или линзы. Так, синие изображения размываются чуть меньше, чем красные, менее размыты и изображения, полученные с помощью линз большего размера.

**Дифракция** Точно так же, как тень от вашей ладони расплывается по краям из-за дифракции огибающего ее света, поток его расширяется при прохождении через узкое отверстие. Следовательно, чем оно уже, тем сильнее расширяется поток света. При проецировании на экран свет, прошедший через отверстие, создает центральное яркое пятно, окруженное чередующимися темными и яркими полосами, или интерференционными кольцами, которые, удаляясь от центра, становятся все более тусклыми. Большая часть лучей проходит по прямой и усиливает друг друга, те же, что проходят под углом, интерферируют, создавая темные и светлые полосы.

Чем меньше отверстие, тем больше расстояние между полосами, поскольку пути лучей более ограничены и потому более схожи. Если вы возьмете два кусочка тонкой газовой ткани, например два шелковых шарфика, приложите один к другому, поднимете к свету и сдвинете один относительно другого, то увидите аналогичные темные и светлые полосы, возникающие вследствие наложения нитей. Если же ткань поворачивать, ваши глаза зафиксируют движущиеся вдоль нее темные и светлые области. Такие интерференционные картины, возникающие при наложении решеток, называют также «муаровым узором».

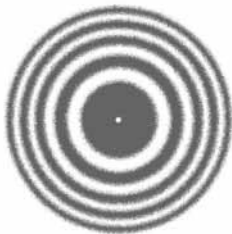
Если пропускное отверстие или линза круглые — как в случае наших зрачков и объектива фотоаппарата, — центральное пятно и окружающие его полоски образуют череду концентрических кругов, названных в честь шотландского физика XIX века Джорджа Эйри «узором (или диском) Эйри».

**Ближнее поле** Дифракция Фраунгофера наблюдается достаточно часто, однако, если источник света находится вблизи плоскости апертуры, могут возникать несколько иные узоры. Падающие на апертуру световые лучи уже не будут параллельными, а волновые фронты окажутся скорее изогнутыми, чем прямыми. В результате возникнет иная дифракционная картина, в которой расстояния между полосами не будут равными одно другому. Череда приходящих к апертуре волновых фронтов будет формировать набор концентрических изогнутых поверхностей, похожих на слои лукавицы, — ширина волнового фронта у всех одинакова, а центром является источник света. Когда эти волновые фронты достигают плоскости апертуры, последняя рассекает их, точно режущий лукавицу колечками нож. За апертурой возникает набор колец, и каждое представляет зону, в которой волны, проходящие через нее, отстают одна от другой ровно на их длину.



Дифракция Фраунгофера

Чтобы понять, как эти преломленные лучи смешиваются друг с другом, нужно сложить все лучи возникающих за апертурой колец. На плоском экране они выглядят как серия темных и светлых полос — как и в случае параллельных лучей, — однако расстояния между ними уже не постоянны, но уменьшаются при удалении от центра. Все это названо «дифракцией Френеля» — в честь открывшего ее французского ученого XIX столетия Огюстена Френеля.



Дифракция Френеля

Френель обнаружил также, что, изменяя апертуру, можно изменять фазы проходящих через нее волн, а значит, и возникающий в результате их прохождения узор. Он использовал это открытие для создания линз нового типа, пропускающих только синфазные волны. Один из способов добиться этого — вырезать из стекла ряд колец, точно соответствующих положениям, скажем, отрицательных провалов волн, проходящих через апертуру, и соорудить из них линзу, — тогда через нее будут проходить лишь положительные вершины волн и почти без интерференции. Альтернативно, можно сдвинуть эти провалы волнового фронта на половину длины волны, чтобы они снова оказались в фазе с волнами, которые распространяются беспрепятственно. Правильно размещая кольца из толстого стекла, можно замедлять движение света, имеющего определенную фазу, сдвигая его на нужную вам часть длины волны.

Используя эту концепцию, Френель сам создал линзы для маяков, впервые примененные во Франции в 1822 году. Представьте себе стекла очков, увеличенные до размеров, необходимых для маяка высотой в 50 футов. Френель предложил в качестве альтернативы комплект колец из довольно тонкого стекла, вес которых составляет лишь малую

## Юнг, опыт с двумя прорезями

Своим прославленным экспериментом 1801 года Томас Юнг окончательно, по-видимому, доказал волновую природу света. Пропустив свет через две прорези в сплошном экране, он увидел не только наложение двух дифракционных картин, но и дополнительные полосы, созданные интерференцией лучей света, прошедших через разные прорези. Лучи интерферировали, создавая темные

и светлые полосы, расстояние между которыми было пропорционально обратному расстоянию между прорезями. Возникал узор, в котором тонкие полосы накладывались на обычный дифракционный рисунок, создаваемый дифракцией на одной апертуре. Добавляя новые прорези, можно было сделать этот второй интерференционный узор более четким.

часть веса одной выпуклой линзы. Линзы Френеля используются для фокусировки света автомобильных фар, а иногда пластиковую пленку, имеющую форму линзы Френеля, наклеивают на заднее стекло автомобиля, чтобы уменьшить невидимую зону позади него.

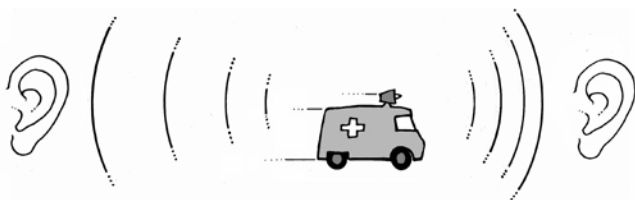
**Решетки** Фраунгофер расширил изучение интерференции, создав первую дифракционную решетку. Решетка содержала большой набор апертур в виде множества рядов параллельных прорезей. Фраунгофер использовал для ее создания расположенные в один ряд проволоки. Дифракционные решетки не только расширяют пучки света — множественные прорези снабжают проходящий через них свет интерференционными характеристиками.

Поскольку свет отклоняется и интерферирует, он ведет себя как волна. Эйнштейн и другие показали, что иногда свет, если к нему приглядеться как следует, ведет себя не только как волна, но и как совокупность частиц. Из этого наблюдения выросла квантовая механика. Удивительно, но, как мы вскоре увидим, в квантовых вариантах опыта с двумя прорезями свет словно бы знает, вести ли ему себя как волна или как совокупность частиц, и изменяет свои характеристики просто потому, что мы за ним наблюдаем.

В сухом остатке  
Интерферирующие  
световые волны

# 19 Эффект Доплера

Все слышали, как снижается тон сирены «скорой помощи», когда машина проносится мимо. Волны, исходящие от источника, который движется к нам, словно сминаются, и потому нам кажется, что частота их возрастает. Волнам, которые распространяются от удаляющегося источника, нужно больше времени, чтобы добраться до нас, что приводит к падению их частоты.



Это и есть эффект Доплера. Его используют для измерения скорости машин, кровотока и движения звезд и галактик во вселенной.

Когда «скорая помощь» проносится мимо по улице, тон ее воющей сирены меняется — с высокого при приближении до низкого при удалении. Это изменение тона называется «эффектом Доплера». Оно было впервые описано в 1842 году австрийским физиком и математиком Кристианом Доплером, возникает же оно вследствие движения издающей звук машины относительно наблюдателя. При приближении машины звуковые волны нагоняют одна другую, расстояние между волновыми фронтами сокращается и тон звука растет. А при ее удалении волновым фронтам требуется чуть больше времени, чтобы достичь вас, интервалы между ними возрастают, а тон падает. Звуковые волны — это пульсации, уплотняющие и разрежающие воздух.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1842**

Доплер публикует статью  
о цветовом сдвиге в свете звезд



### Кристиан Доплер, 1803–1853

Кристиан Доплер родился в Зальцбурге, Австрия, в семье каменщиков. Поскольку слабое здоровье не позволяло ему заниматься семейным делом, он поступил в Венский университет, где изучал математику, философию и астрономию. Прежде чем получить место в Пражском университете, Доплер вынужден был работать бухгалтером и даже подумывал об эмиграции в Америку. Однако и став профессором, Доплер изнемогал под бременем преподавания, и здоровье его ухудшалось. Один из его друзей писал: «Трудно поверить, какого гения получила Австрия в лице этого человека. Я писал... ко множеству людей, которые могли бы спасти Доплера для науки, не дать ему умереть под ярмом. К несчастью, приходится ожидать худшего». В конце концов Доплер покинул Прагу и возвратился в Вену. В 1842 году он опубликовал статью, описывавшую цветовой

смещение в излучении звезд, — то, что мы теперь называем «эффектом Доплера».

*«Можно почти с определенностью сказать, что в не столь уж и далеком будущем это даст астрономам приятную возможность определять движение звезд и расстояния до них, то есть производить измерения, на которые — вследствие огромной удаленности звезд от нас и малости параллактических углов — до сей поры никаких надежд не существовало».*

Статья эта, хоть все и признавали силу творческого воображения ее автора, получила от выдающихся ученых того времени оценки самые разные. Хулители Доплера ставили под сомнение его математические способности, тогда как друзья очень высоко оценивали творческие способности и интуицию.

**Туда-сюда** Представьте себе, что кто-то, стоящий на движущейся платформе или в двери поезда, бросает в вас мячи с частотой один мяч каждые три секунды, которые этот человек отсчитывает по своим наручным часам. Если он приближается к вам, мячи вы будете получать чуть чаще, чем один за три секунды, потому что каждому следующему придется пролетать, чтобы попасть к вам, расстояние несколько меньшее. Поэтому частота их появления покажется вам, ловцу мячей, увеличившейся. Подобным же образом, когда платформа начнет удаляться от вас, каждому следующему мячу придется пролетать расстояние несколько большее, чем предыдущему, отчего частота их появления понизится.

**1912**

Весто Слайфер измеряет красное смещение галактик

**1992**

С помощью эффекта Доплера открыта первая планета за пределами Солнечной системы (экзопланета)



**«Возможно, когда обитатели других планет ловят какие-то из наших волн, они слышат только одно — непрерывный вопль»**

**Айрис Мёрдок, 1919–1999**

Если бы вам удалось измерить этот сдвиг во времени по вашим часам, вы смогли бы определить скорость движения платформы. Эффект Доплера применим к любым движущимся относительно друг друга телам. Он был бы тем же самым, если бы в поезде ехали вы, а метатель мячей стоял на неподвижной платформе. Как средство измерения скорости, этот эффект имеет множество применений. Он используется

в медицине для измерения кровотока, и на нем же основано устройство радаров дорожной полиции, позволяющих ей выявлять превышающих скорость водителей.

**Движение в космосе** Эффект Доплера часто используется и в астрономии для поисков движущегося вещества. Например, в свете, поступающем от планеты, которая вращается вокруг удаленной звезды, должны присутствовать доплеровские смещения. Когда планета движется в нашу сторону, частота ее света возрастает, когда уходит

## Экзопланеты

К настоящему времени открыто больше 200 планет, вращающихся вокруг далеких звезд. В большинстве своем это газовые гиганты, подобные Юпитеру, однако орбиты их расположены гораздо ближе к центральной звезде. Впрочем, существует, возможно, и несколько твердых планет, похожих на нашу Землю. Планеты имеются примерно у каждой десятой звезды, и это дает пищу для рассуждений о том, что, возможно, на некоторых из них могут существовать и какие-то формы жизни. Подавляющее большинство планет было обнаружено посредством наблюдения их гравитационного воздействия на звезды, вокруг которых они вращаются. В сравнении с этими звездами планеты очень малы, и увидеть их на фоне свечения звезд затруднительно. Однако масса планеты слегка раскачивает ее звезду, и это качание можно наблюдать как доплеровское смещение в характерном для звезды спектре.

Первые две экзопланеты были открыты у пульсара (1992) и у обычной звезды (1995). Ныне их обнаружение стало рутинным процессом, однако астрономы все еще ищут солнечные системы, подобные нашей, и пытаются понять, как возникают различные планетарные конфигурации. Ожидается, что новые космические обсерватории, а именно запущенный в 2006 году в космос европейский телескоп COROT и принадлежащий НАСА (запущен в 2008-м) «Кеплер», позволят в ближайшем будущем обнаружить немало планет, подобных Земле.

от нас — падает. О свете, который поступает от приближающейся планеты, говорят, что он испытывает «синее смещение», о свете удаляющейся планеты — «красное». Начиная с 1990-х были обнаружены сотни планет, вращающихся вокруг удаленных звезд, — именно в те годы астрономы научились отыскивать в свете центрального светила следы присутствия планет.

Красное смещение может возникать не только у вращающихся по своим орбитам планет, но и как следствие расширения самой вселенной, — такое красное смещение называется «космологическим». Если в результате расширения вселенной расстояние между нами и далекой галактикой неуклонно возрастает, это аналогично тому, что она с некоторой скоростью улетает от нас. Подобным же образом две точки, нанесенные на надуваемый воздушный шарик, удаляются одна от другой.

В результате свет, излучаемый галактикой, смещается к более низким частотам, поскольку его волны вынуждены проходить, чтобы добраться до нас, все большие и большие расстояния. Строго говоря, космологическое красное смещение не является истинно доплеровским эффектом, поскольку удаляющаяся от нас галактика не движется относительно каких бы то ни было близких к ней тел. Окружение галактики остается фиксированным, на самом деле происходит растяжение пространства между ней и нами.

Доплер, надо отдать ему должное, понимал, какую пользу его открытие может принести астрономам, однако и он не мог предвидеть все обилие следствий, проистекающих из открытого им эффекта. Он сообщил, что увидел его в свете, поступающем от двойной звезды, но в его время и это подвергалось сомнению. Как ученый Доплер обладал воображением и творческими способностями, однако энтузиазм его порою брал верх над присущим ему мастерством экспериментатора. Впрочем, десятилетия спустя красное смещение галактик было измерено астрономом Весто Слайфером, что и заложило основу для развития модели Большого взрыва, вследствие которого возникла вселенная. Эффект Доплера и поныне позволяет открывать вокруг далеких звезд миры, в которых возможно существование жизни.

## В сухом остатке Совершенство тона

# 20 Закон Ома

**Почему пассажирам самолета, летящего через грозу, ничего не грозит? Как громоотводы спасают дома? Отчего лампочка, горящая в вашей квартире, не тускнеет, когда вы включаете другую? Ответы на эти вопросы дает закон Ома.**

Электричество возникает вследствие движения электрических зарядов. Наличие электрического заряда — фундаментальное свойство элементарных частиц, определяющее их взаимодействие с электромагнитными полями. Эти поля создают силы, которые приводят заряженные частицы в движение. Как и энергия, общий заряд сохраняется, его нельзя уничтожить или создать, но можно перемещать из одного места в другое. Заряд может быть положительным либо отрицательным. Частицы с противоположными зарядами притягивают друг друга, частицы с одинаковыми отталкивают. Электроны имеют отрицательный заряд (измеренный в 1909-м Робертом Милликеном), протоны — положительный. Однако не все элементарные частицы заряжены. Нейтрон, как следует из его названия, заряда не имеет и потому «нейтрален».

**Статическое электричество** Электричество может быть статическим, то есть фиксированным распределением зарядов, однако заряды могут и двигаться, создавая электрический ток. Статическое электричество тоже возникает вследствие движения, при котором противоположные заряды скапливаются в различных местах. Например, если вы потрете пластмассовой расческой о рукав, она зарядится и сможет притягивать к себе маленькие тела, обладающие противоположными зарядами — такие, как клочки бумаги. Подобным же образом возникают молнии — трение молекул при вихревом движении в грозовых тучах приводит к накоплению в них электричества, а резкий разряд создает молнию. Последняя может достигать в длину нескольких миль, а температура ее — десятков тысяч градусов по Цельсию.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1752**

Франклин ставит опыт с молнией

**1826**

Ом публикует свой закон

## Бенжамин Франклин, 1706–1790

Бенжамин Франклин родился в Бостоне, США, — пятнадцатым и самым младшим сыном изготовителя сальных свечей. Отец хотел, чтобы он стал священником, однако Бен кончил тем, что стал печатником. Даже после того, как к нему пришла слава, он скромно подписывался: «Б. Франклин, печатник». Франклин издавал «Альманах бедного Ричарда», принеся ему известность благодаря западавшим в память афоризмам, наподобие «Рыба и гости начинают пованивать на третий день». Он был замечательным изобретателем, придумавшим громоотвод, стеклянную гармонику, бифокальные очки и многое другое, — но более всего его привлекало электричество. В 1752 году

Франклин поставил самый знаменитый из его опытов — вытянул из грозовой тучи молнию, запустив во время грозы воздушного змея. В более поздние годы Франклин внес большой вклад в жизнь американского общества, он создал первые публичные библиотеки, больницы, добровольные пожарные команды и много трудился, добиваясь уничтожения рабства. Он стал политиком, а во время и после Войны за независимость выполнял дипломатические миссии, представляя интересы Соединенных Штатов в Великобритании и Франции. Был он и членом Комитета пяти, который в 1776 году разработал проект Декларации независимости.

**В движении** Электрический ток в наших домах — это поток зарядов. Металлическая проволока проводит электричество потому, что в металле электроны не связаны с атомными ядрами и их можно легко привести в движение. Металлы называют «проводниками» электричества. Электроны движутся по металлическому проводу, как вода по трубе. В других материалах двигаться могут положительные заряды. Когда в воде растворяют химическое вещество, его электроны и положительно заряженные ядра атомов (ионы) отделяются друг от друга. Проводящие материалы, такие как металл, позволяют зарядам легко перемещаться в них. Материалы, не пропускающие электричество, — керамика или пластики — называются «изоляторами». Материалы, проводящие электричество лишь при определенных условиях, именуется «полупроводниками».

Подобно гравитации, электрический ток может создаваться градиентом — в данном случае электрическим полем или электрическим потенциалом. Точно так же, как простое изменение высоты (гравитационного потенциала) заставляет реку течь вниз, изменение электрического потенциала на двух концах проводящего материала

## 1909

Милликен измеряет заряд индивидуального электрона



В 1752 году, в Филадельфии, Бенжамин Франклин успешно «извлек» электричество из грозовой тучи с помощью воздушного змея.

заставляет поток зарядов течь через него. Такая «разница потенциалов», или напряжение, направляет электрический ток и, кроме того, снабжает заряды энергией.

**Сопrotивление** Когда ударяет молния, поток электрических зарядов устремляется к земле через ионизированный воздух. При этом он аннулирует направляющую его разницу потенциалов, отчего удар молнии выглядит как прохождение тока огромной величины. Именно этот ток, а не напряжение убьет вас, если пройдет через ваше тело. На практике через большинство материалов заряды с такой огромной скоростью продвигаться не могут, потому что сталкиваются с сопротивлением.

Сопrotивление ограничивает величину тока, поскольку рассеивает электрическую энергию, преобразуя ее в тепловую. Чтобы вас не убила молния, вы можете встать на изолятор, — к примеру, на резиновый коврик, обладающий очень большим сопротивлением. Можно также укрыться в металлической клетке, поскольку пройти через ее прутья молнии легче, чем через ваше тело, состоящее преимущественно из воды. Такую конструкцию называют «клеткой Фарадея» — по имени Майкла Фарадея, построившего первую из них в 1836 году. Рисунок электрического поля, создаваемый клеткой Фарадея — полым проводником, означает, что заряды переносятся снаружи клетки, а внутри она полностью нейтральна.

Для ученых XIX века, проводивших демонстрации искусственно созданных молний, клетки Фарадея были весьма полезны. Они и сейчас позволяют оберегать электронное оборудование и объясняют, почему вам ничто не грозит в металлическом

самолете, летящем через грозу, — даже если в него попадает молния. Такую же безопасность обеспечивает металлический автомобиль, — если, конечно, вы не поставите его рядом с деревом.

## Молния

Молния, может быть, и не ударяет дважды в одно и то же место, но в среднем каждую секунду по поверхности Земли бьет сотня молний — или 8,6 миллиона молний в день. В одних только США земля получает за год 20 миллионов ударов молнии от 100 000 гроз.

Подобным же образом работает громоотвод Бенжамина Франклина, обеспечивающий для тока молнии путь, который обладает низким сопротивлением, — молния скорее ударит в громоотвод, чем в здание с высоким сопротивлением. Наилучший результат дают заостренные металлические стержни, потому что на кончиках их имеет место высокая концентрация электрического поля, а это

повышает вероятность того, что электричество изберет, направляясь к земле, именно этот путь. Концентрацию электрического поля создают и высокие деревья, поэтому прятаться под ними в грозу — идея не из лучших.

**Цепи** Потоки электричества следуют по замкнутым контурам, «электрическим цепям». Движение тока и энергии по цепям можно сравнить с движением воды по череде труб. Сила тока подобна скорости потока воды, напряжение — ее давлению, а сопротивление — ширине трубы или пропускного отверстия вставленной в нее заслонки.

Георг Ом опубликовал в 1826-м один из самых полезных для интерпретации электрических цепей законов. В алгебраической форме он выглядит так:  $V = IR$ , то есть падение напряжения ( $V$ ) равно произведению силы тока ( $I$ ) на сопротивление ( $R$ ). Согласно закону Ома, напряжение пропорционально силе тока и сопротивлению. Удвойте напряжение в цепи — и вы удвоите протекающий через нее ток, но при условии, что сопротивление останется неизменным; чтобы сохранить прежний ток, нужно удвоить и сопротивление. Сила тока и сопротивление обратно пропорциональны. Закон Ома применим даже к очень сложным цепям со множеством контуров. Простейшую цепь можно представить себе как одну электрическую лампочку, подсоединенную проводом к батарее. Батарея обеспечивает разность потенциалов, необходимую для движения тока по проводу, а вольфрамовая спираль лампочки обеспечивает сопротивление, преобразующее электрическую энергию в свет и тепло. А если вы введете в цепь вторую лампочку? Согласно закону Ома, если лампочки идут в цепи одна за другой, сопротивление удваивается, напряжение на каждой из них будет падать, следовательно, энергию, доступную каждой, нужно будет разделить на два. Если вы создаете таким образом систему освещения квартиры, пользы это вам не принесет: при всяком включении второй лампочки обе будут гореть тускло.

Но если подсоединить вторую лампочку поперек замкнутой цепи, включающей в себя и первую, на каждой из них будет происходить полное падение напряжения. В месте подсоединения ток будет расходиться по двум путям и проходить через лампочки по отдельности — вторая лампочка будет гореть так же ярко, как первая. Такая цепь называется «параллельной». А первая, в которой сопротивления следуют одно за другим, «последовательной». Закон Ома позволяет рассчитывать напряжения и токи в любой точке любой цепи.

## В сухом остатке Теория электрической цепи



# 21 Правило правой руки

Когда вы ночами ездите на велосипеде, то, наверное, используете динамо-машину, чтобы питать электричеством велосипедные фары. Колеса вращают рифленый стерженек, создавая напряжение, которого оказывается достаточно для питания двух лампочек. А горят они потому, что динамо-машина создает ток, направление которого определяется легко запоминающимся, сформулированным Флемингом правилом правой руки.

Электромагнитная индукция может использоваться для перехода от одних видов электрических и магнитных полей к другим. Она работает в трансформаторах, которые управляют электрическими сетями, в зарядных устройствах и даже велосипедных динамо-машинах. Когда изменяющееся магнитное поле проходит через проволочную катушку, оно создает силу, которая действует на имеющиеся в ее металле свободные электроны, приводя их в движение и создавая электрический ток.

В маленьком металлическом кожухе динамо-машины находится проволочная катушка со вставленным в нее магнитом. Входящий

**Сам Фарадей назвал свое открытие намагничиванием света и освещением силовых линий магнитного поля**

**Питер Зеeman, 1903**

в катушку стержень вращается колесом велосипеда и сам вращает магнит. Вращающийся магнит создает переменное магнитное поле, которое приводит в движение заряды (электроны) проволоки, и они создают электрический ток. О последнем говорят, что он индуцируется в катушке благодаря явлению электромагнитной индукции.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1745**

Изобретен конденсатор, получивший название «лейденская банка»

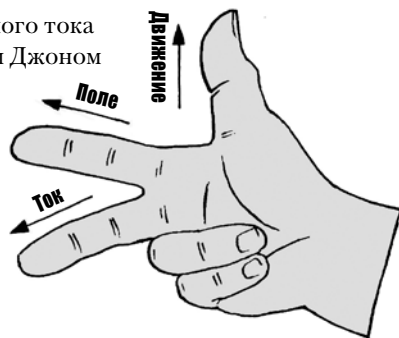
**1820**

Эрстед устанавливает связь электричества с магнетизмом



**Хорошее правило** Направление индуцированного тока задается сформулированным шотландским инженером Джоном Амброзом Флемингом правилом правой руки.

Раскройте правую ладонь так, чтобы большой палец указывал вверх, указательный вперед, а средний влево, под прямым углом к большому. Если проводник движется вверх вдоль большого пальца, а магнитное поле направлено вдоль указательного, то индуцируемый ток потечет вдоль среднего — и каждое направление будет составлять с двумя другими прямой угол. Удобное правило — и легко запоминающееся.



Индуктируемый ток можно увеличить, повысив число витков проволоки — тогда магнитное поле будет чаще менять направление вдоль ее длины — или убыстрив движение магнита. Именно по последней причине велосипедные фары горят ярче, когда вы быстрее крутите педали. Что, собственно говоря, движется — магнит или катушка, неважно, главное, чтобы они перемещались один относительно другой.

Взаимоотношения между изменяющимся магнитным полем и силой, которую он индуцирует, выражаются законом Фарадея. Индуцируемая сила, именуемая «электродвижущей силой» (сокращенно эдс), определяется числом витков катушки, умноженным на скорость изменения магнитного потока (которая пропорциональна напряженности магнитного поля и площади катушки). Направление индуцируемого электрического тока всегда противоположно причине, его возбуждающей (это называется «правилом Ленца»). Будь это не так, в системе возникало бы самоусиление, нарушающее закон сохранения энергии.

**Фарадей** Электромагнитная индукция была открыта в 1830 году Майклом Фарадеем. Фарадей, британский физик, прославился экспериментами с электричеством. Он не только установил, что погруженный в ртуть магнит начинает вращаться, а это был принцип создания электродвигателя, но и показал, что магнитное поле воздействует на свет. Вращая с помощью магнита плоскость поляризации света, он понял, что и сам свет имеет электромагнитную природу.

До Фарадея ученые полагали, что существует много типов электричества, которые проявляются в различных ситуациях. Именно Фарадей показал, что все эти типы можно описать в рамках единой системы, основанной на движении заряда. Он не был математиком, его называли даже «математически безграмотным», и тем не менее его

1831

Фарадей открывает электромагнитную индукцию

1873

Максвелл публикует свои уравнения, описывающие электромагнетизм

1892

Флеминг представляет теорию трансформатора

### Майкл Фарадей, 1791–1867

Британский физик Майкл Фарадей был самоучкой — работая подмастерьем переплетчика, он читал книги, которые попадались ему в руки. Совсем молодым человеком Фарадей посетил четыре лекции химика Гэмфри Дэви в Лондонском королевском институте, и они произвели на него настолько сильное впечатление, что он написал Дэви письмо, попросив дать ему какую-нибудь работу. Просьба была отклонена, однако Фарадей все же начал работать в Королевском институте, большую часть времени проводя на подхвате у сотрудников института, но между делом пытаясь также создать электродвигатель. В 1826 году он начал проводить в Королевском институте пятничные беседы и рождественские лекции — и те и другие продолжаются и поныне. Занимаясь исследованием

электричества, Фарадей открыл в 1831 году явление электромагнитной индукции. Он получил признание как чрезвычайно искусный экспериментатор и занимал несколько официальных постов, в частности — советника Тринити-Хаус (организации, которая отвечает за обслуживание навигации в территориальных водах Англии), помогавшего в создании электрических маяков. Удивительно, быть может, но Фарадей отверг попытку возвести его в рыцарское достоинство и предложение президентства в Королевском обществе (и не одно, а два предложения). Последние свои дни Фарадей, здоровье которого ухудшилось, провел в королевском дворце Хэмптон-Корт, в доме, который принц Альберт подарил ему в знак признания его огромных заслуг перед наукой.

идей, касавшиеся электрического и магнитного полей, были приняты еще одним британским физиком, Джеймсом Клерком Максвеллом, который свел их в четыре знаменитых уравнения, и по сей день остающихся краеугольным камнем современной физики (см. с. 88).

**Ничто истинное и отвечающее законам природы не может считаться слишком чудесным**

**Майкл Фарадей, 1849**

**Хранение заряда** Имя Фарадея носит единица электрической емкости, фарад, количество таких единиц указывается на каждом конденсаторе. Конденсаторы, присутствующие едва ли не в каждой электрической цепи, обеспечивают временное накопление и сохранение электрического заряда. Например, вспышка фотоаппарата хранит заряд с помощью конденсатора — и вам приходится ждать, пока он накопится и вы сможете сделать снимок. Даже если вы используете обычные батарейки, возникающее при накоплении заряда напряжение оказывается очень большим — несколько сотен вольт, поэтому, прикоснувшись к конденсатору, вы можете получить серьезный электрический удар.

Простейший конденсатор состоит из двух параллельных металлических пластинок, между которыми находится воздух. Однако конденсаторы можно изготавливать и из «сэндвичей» практически любых проводящих электричество или способных удерживать заряды материалов. Первыми устройствами, которые использовались в XVIII столетии для хранения заряда, были стеклянные банки (их называли «лейденскими») с покрытыми металлом внутренними поверхностями. Ныне такие «сэндвичи» изготавливают из алюминиевой фольги, ниобия, бумаги, полиэфирного волокна и тефлона. Если подсоединить конденсатор к батарее, то при ее включении на каждой из его пластин скапливаются противоположные заряды. При отключении батареи заряды высвобождаются в виде тока. Ток этот слабее, поскольку его «давление» уменьшается по мере уменьшения зарядов. Поскольку зарядка и разряд конденсатора требуют времени, они могут в значительной мере задерживать прохождение тока по электрическим цепям. Конденсаторы часто используют совместно с индукторами (например, катушками проволоки, добавляющими в цепь индуцированные токи) — это позволяет создавать цепи, в которых заряд осциллирует, возрастая и уменьшаясь.

**Трансформаторы** Электромагнитная индукция используется не только в динамо-машинах и электродвигателях, но и в электрических трансформаторах. Трансформатор генерирует переменное магнитное поле, которое индуцирует ток в катушке провода. Простой трансформатор представляет собой кольцевой магнит с двумя проволочными обмотками. Изменение электрического поля в первой обмотке создает в магните осциллирующее магнитное поле, а оно индуцирует новый электрический ток во второй обмотке.

Согласно закону Фарадея, сила индуцируемого тока зависит от числа витков катушки, и это позволяет создавать трансформаторы с настраиваемым выходным током. При передаче электричества по общегосударственной сети электроснабжения эффективнее и надежнее использовать малую величину тока и большую — напряжения. Трансформаторы используются на обоих концах сети, повышая напряжение и снижая ток перед распределением электрической энергии и проделывая обратное перед ее применением. Если вы когда-нибудь притрагивались к блоку питания компьютера или зарядному устройству, то вам известно, что стопроцентной эффективностью трансформаторы не обладают, поскольку они нагреваются и нередко гудят, расходуя энергию на звуки, вибрацию и нагрев.

## В сухом остатке Правила индукции

# 22 Уравнения Максвелла

Четыре уравнения Максвелла — это краеугольный камень современной физики и ее самый серьезный шаг вперед со времени создания теории всемирного тяготения. Они описывают электрическое и магнитное поля как две стороны одной монеты. Оба поля — это проявления одной и той же сущности — электромагнитной волны.

В начале XIX столетия было экспериментально показано, что электричество и магнетизм способны преобразовываться одно в другое. Но только Джеймс Клерк Максвелл смог сделать колоссальный шаг вперед, выведя четыре уравнения, полностью описывающие электромагнетизм и ставшие одним из главных достижений современной физики.

**Электромагнитные волны** Электрические и магнитные силы воздействуют на заряженные частицы и магниты, соответственно. Переменные электрические поля генерируют магнитные, и наоборот. Максвелл показал, как и те и другие возникают из одного и того же явления, электромагнитной волны, обладающей и электрическими, и магнитными свойствами. Электромагнитные волны несут переменное электрическое поле, сопровождаемое магнитным, которое меняется подобным же образом, но направлено под прямым углом к электрическому.

Максвелл измерил скорость распространения электромагнитной волны в вакууме, показав, что она ничем не отличается от скорости распространения света. С учетом работ Ханса Кристиана Эрстеда и Фарадея это подтвердило, что и свет является распространяющимся электромагнитным возмущением. Максвелл показал, что и световые волны, и все электромагнитные распространяются в пустоте с постоянной скоростью 300 миллионов метров в секунду. Эта скорость

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1600

Уильям Гильберт исследует электричество и магнетизм

1752

Бенжамин Франклин проводит опыты с молнией

1820

Эрстед связывает электричество с магнетизмом

определяется абсолютными электрическими и магнитными свойствами пустого пространства.

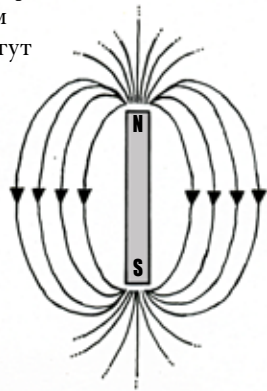
Электромагнитные волны могут иметь самые разные длины волн и охватывают широкий спектр, выходящий далеко за пределы обычного видимого света.

Наибольшей длиной обладают радиоволны (метры и даже километры), длины волн видимого света сопоставимы с расстояниями между атомами, а наивысшей частотой обладают рентгеновские и гамма-лучи.

Мы используем электромагнитные волны главным образом для связи — радио, телевидение, мобильные телефоны. Они могут также создавать тепловую энергию (микроволновые печи) и использоваться в исследовательских целях (медицинская рентгеноскопия, электронные микроскопы).

Электромагнитная сила, создаваемая электромагнитными полями, — это одна из четырех фундаментальных сил природы, три другие — гравитационная и силы слабого и сильного ядерного взаимодействия, обеспечивающие целостность атомов и их ядер. Электромагнитные силы играют важнейшую роль в химии, они связывают заряженные ионы, образующие химические вещества и их молекулы.

**Поля** Максвелл начал с попыток осмыслить работы Фарадея, экспериментально описавшего электрическое и магнитное поля. Для физики поле — это средство передачи сил на расстояние. Гравитация распространяется в космосе на огромные расстояния посредством того, что называют «гравитационным полем». Подобным же образом электрическое и магнитное поля могут воздействовать на удаленные, обладающие зарядом частицы. Если вам доводилось забавляться с металлическими опилками, высыпанными на лист бумаги, под которым находится магнит, вы видели, как магнитная сила сдвигает опилки, создавая из них рисунок замкнутых линий, соединяющих северный и южный полюса магнита. При этом магнитная сила падает по мере удаления от магнита. Фарадей изобразил эти «магнитные линии» и вывел для них простые правила. Ему удалось также нарисовать аналогичные линии для электрически заряженных тел, однако в математике он силен не был. Для того чтобы соединить идеи Фарадея в математическую теорию, понадобился Максвелл.



**Теперь нам навряд ли удастся уклониться от вывода о том, что свет представляет собой поперечные колебания той же среды, которая создает электрические и магнитные явления**

**Джеймс Клерк Максвелл, 1862**

**1831**

Фарадей открывает электромагнитную индукцию

**1873**

Максвелл публикует уравнения электромагнетизма

**1905**

Эйнштейн публикует специальную теорию относительности

**Четыре уравнения** К большому удивлению ученого мира, Максвелл сумел описать все многообразные электромагнитные явления с помощью всего лишь четырех фундаментальных уравнений. Ныне они настолько известны, что ими украшают футболки, добавляя комментарий: «Вот таким Бог создал свет». Сейчас электромагнетизм представляется нам вполне привычным, но во времена Максвелла идея его была радикальной и такой же значительной, какой стала бы сейчас единая теория квантовой физики и гравитации.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + (\delta \mathbf{D} / \delta t)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -(\delta \mathbf{B} / \delta t)$$

#### Уравнения Максвелла

Первое из уравнений Максвелла — это закон Гаусса, названный так в честь немецкого физика XIX века Карла Фридриха Гаусса и описывающий форму и силу электрического поля, генерируемого телом, которое обладает электрическим зарядом. Закон Гаусса — это закон обратного квадрата, математически схожий с гравитационным законом Ньютона. Электрическое поле, подобно гравитационному, спадает, удаляясь от поверхности заряженного тела, в обратной пропорции квадрату расстояния до него. То есть если вы удвоите расстояние от заряженного тела, то электрическое поле ослабнет в четыре раза.

Научных свидетельств того, что сигналы мобильного телефона дурно сказываются на вашем здоровье, не существует, однако закон обратного квадрата говорит, что, возможно, мачта мобильной связи, находящаяся вблизи от вашего дома, безопаснее, чем та, что стоит вдали от него. Поле передающей мачты быстро слабеет с увеличением расстояния до нее, и потому до вас оно доходит уже очень слабым. Поле, создаваемое

### Джеймс Клерк Максвелл, 1831–1879

Джеймс Клерк Максвелл родился в Эдинбурге, Шотландия. Вырос он в сельской местности, где и проникся интересом к природе. После смерти его матери Максвелла отправили учиться в Эдинбург, учеба поглощала его настолько, что одноклассники прозвали Максвелла «чокнутым». В Эдинбургском университете и затем в Кембридже его считали студентом умным, но неорганизованным. Окончив университет, он занялся развитием трудов Фарадея, посвященных электричеству и магнетизму, стараясь

свести их в уравнения. Когда отец его заболел, Максвелл вернулся в Шотландию и попытался получить место в Эдинбурге. Однако место это досталось старому наставнику Максвелла, и он перебрался в Лондонский королевский колледж, где и проделал большую часть прославившей его работы. Около 1862 года Максвелл произвел расчеты, показавшие, что электромагнитные волны распространяются с той же скоростью, что и свет, а 11 лет спустя опубликовал четыре своих уравнения электромагнетизма.



мобильным телефоном, оказывается — в сравнении — сильным, поскольку вы держите его вблизи от головы. Поэтому чем ближе мачта, тем меньшую мощность приходится излучать потенциально опасному мобильному телефону. Но люди склонны к иррациональному поведению и мачт боятся сильнее.

Второе уравнение Максвелла описывает силу и форму магнитного поля, или рисунок создаваемых магнитом силовых линий. Оно утверждает, что силовые линии магнитного поля всегда замкнуты на северный и южный полюса магнита. Иными словами, все магниты должны обладать северным и южным полюсами — магнитных монополей не существует, а у магнитного поля всегда имеется начало и конец. Это проистекает из теории атомов, в которой каждый атом обладает магнитным полем, а магнетизм большого масштаба возникает из сложения этих полей. Если вы разрубите магнит пополам, у каждой половинки все равно будет два полюса. И на какие бы мелкие части вы магнит ни делили, полюса всегда останутся при них.

Третье и четвертое уравнения схожи одно с другим и описывают электромагнитную индукцию. Третье уравнение показывает, каким образом изменения электрического тока создают магнитное поле, а четвертое — каким образом изменения магнитного поля создают электрический ток. Последнее уравнение известно также как закон индукции Фарадея.

Описание столь многих явлений столь малым числом уравнений было великим подвигом, заставившим Эйнштейна поставить достижения Максвелла вровень с ньютоновскими. Эйнштейн использовал идеи Максвелла, создавая свои теории относительности. В уравнениях Эйнштейна магнетизм и электричество стали проявлениями одной и той же физической сущности, наблюдаемой из разных систем отсчета; электрическое поле одной движущейся системы отсчета может выглядеть как магнитное в другой. Возможно, именно Эйнштейн в конечном счете и показал, что электрическое и магнитное поля — это, по сути, одно и то же.

**Любой образованный дурак способен раздуть и усложнить все что угодно... Но чтобы пойти в противоположном направлении, нужно обладать качествами гения — и немалой отвагой**

Приписывается  
Альберту Эйнштейну, 1879–1955

В 1930-х британский физик Пол Дирак, пытаясь объединить электромагнетизм с квантовой теорией, предсказал возможность существования магнитных монополей. Пока что доказать это никому не удалось.

**В сухом остатке  
И стал свет**

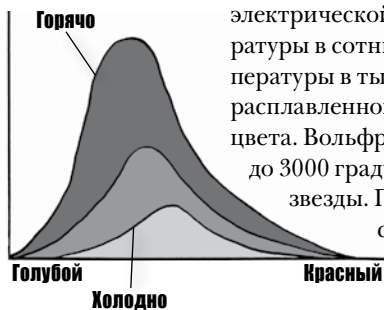


# 23 Закон Планка

**Почему мы говорим «раскален докрасна»? И почему нагреваемая сталь становится сначала красной, потом желтой, а потом белой? Макс Планк описал эти цветовые изменения, связав воедино физику тепла и света. Революционная идея Планка, давшего скорее статистическое, чем волновое, описание света, стала семенем, из которого выросла квантовая физика.**

В своей знаменитой речи 1963 года британский премьер-министр Гарольд Вильсон изумлялся «белому накалу этой [технологической] революции». Но откуда взялось такое словосочетание — «белый накал»?

**Цвет тепла** Все мы знаем, что при нагревании многие физические тела меняют цвет. Угли, на которых мы жарим шашлыки, как и спираль электрической плитки, становятся красными, разогреваясь до температуры в сотни градусов Цельсия. Вулканическая лава, достигая температуры в тысячу градусов Цельсия (примерно такова же температура расплавленной стали), окрашивается в оранжевый, желтый и даже белый цвета. Вольфрамовая спираль электрической лампочки раскаляется до 3000 градусов Цельсия, а это уже близко к температуре поверхности звезды. По сути дела, при увеличении температуры тела светятся сначала красным, затем желтым и, наконец, белым светом. Белым свет становится потому, что к основным цветам, красному и желтому, добавляется голубой. Такое распределение цветов именуется «кривой излучения черного тела».



Точно так же и звезды — чем горячее, тем голубее. Солнце, имеющее температуру в 6000 градусов Кельвина, желтое, а температура поверхности красного гиганта Бетельгейзе (обнаруженного в созвездии Орион) достигает лишь половины этого значения. Звезды более горячие, например Сириус, самая яркая на небосклоне звезда,

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1862**

Густав Кирхгоф впервые использует термин «черное тело»

**1901**

Планк публикует закон излучения черного тела

### Макс Планк, 1858–1947

Образование Макс Планк получил в немецком Мюнхене. Планк хотел посвятить себя музыке и поинтересовался у знакомого музыканта, что ему следует для этого изучить, но получил ответ: раз вы задаете такой вопрос, вам лучше заняться чем-то другим. Не более вдохновляющие слова услышал он и от своего университетского профессора физики, заверившего юношу, что физика как наука завершена и надежды узнать что-то новое в ней не осталось. По счастью, Планк ему

не поверил и занялся исследованиями, которые привели его к концепции кванта. В поздние годы жизни Планку пришлось пережить смерть жены и нескольких детей, в том числе и двух сыновей, погибших в мировых войнах. Тем не менее Планк остался в Германии и старался в послевоенные годы восстановить физические исследования. В настоящее время многие престижные исследовательские институты, созданные Максом Планком, носят его имя.

температура поверхности которой доходит до 30 000 градусов Кельвина, выглядят бело-голубыми. По мере увеличения температуры звезда начинает излучать свет на все более и более высоких, голубых частотах. А совсем уж горячие звезды голубеют настолько, что большая часть их излучения приходится на ультрафиолетовую область спектра.

**Излучение черного тела** Ученые XIX века сильно удивились, обнаружив, что свет, излучаемый телами при нагревании, следует одному и тому же шаблону, независимо от вещества, из которого эти тела состоят.

Наибольшая часть света излучается на какой-то одной частоте. При повышении температуры эта пиковая частота сдвигается к более голубым (коротким) длинам волн — от красного к желтому и бело-голубому.

Мы используем термин «излучение черного тела», имея на то основательную причину. Черные материалы лучше всех прочих поглощают и излучают тепло. Если вы когда-нибудь надевали в жаркий день черную футболку, то знаете, что солнце нагревает ее сильнее, чем белую. Белое тело лучше отражает солнечный свет, вот почему в жарких странах дома часто красят

**«...[создание теории черного тела было] актом отчаяния, поскольку теоретическую интерпретацию следовало найти любой ценой, пусть даже самой высокой»**

Макс Планк, 1901

**1905**

Эйнштейн идентифицирует фотон и дает доказательство невозможности ультрафиолетовой катастрофы

**1996**

Данные, полученные со спутника COBE, позволяют точно установить температуру космического микроволнового фонового излучения

## Космическое наследие Планка

Наиболее совершенный спектр излучения черного тела дает нам вселенная. Все наше небо купается в призрачно светящихся микроволнах, в послесвечении возникшего при Большом взрыве огненного шара, это свечение смещается из-за расширения вселенной в красную сторону. Свечение это называется «космическим микроволновым фоновым излучением». В 1990-х спутник НАСА COBE (*Cosmic Background Explorer* — Исследователь космического фона) измерил его температуру — оно

обладает спектром черного тела, охлажденного до температуры 2,73 градуса Кельвина, и столь однородно, что и поныне дает самую чистую из когда-либо измеренных кривую излучения черного тела. На Земле нет материалов, обладающих такой температурой. Не так давно Европейское космическое агентство почтило память Планка, назвав в его честь свой новый спутник, которому предстоит дать более точные представления о космическом микроволновом фоне.

белой краской. Отражается солнечный свет и снегом. Климатологи опасаются, что если Земля будет нагреваться с более высокой скоростью, то это приведет к таянию полярных ледяных шапок, а в результате солнечного света будет отражаться обратно в космос меньше, чем сейчас. Тела черного цвета не только поглощают тепло быстрее, чем белые, но и быстрее от него избавляются. Так что поверхности плит и печей окрашивают черной краской не только для того, чтобы скрыть сажу!

**Революция** Несмотря на то что физикам удалось промерить излучение черного тела, постичь его или объяснить, почему пик частоты приходится на один-единственный цвет, они не смогли. Таким выдающимся мыслителям, как Вильгельм Вин, лорд Рэлей и Джеймс Джинс, удалось найти лишь частные решения. Вин математически описал ослабление яркости на голубых частотах, а Рэлей и Джинс объяснили возникновение красного спектра, однако на противоположных концах спектра обе формулы работать переставали. В частности, решение Рэрея и Джинса привело к проблемам, поскольку предсказывало высвобождение бесконечного количества энергии на ультрафиолетовых длинах волн и выше них — там спектр получался уходящим вверх до бесконечности. Эта очевидная проблема получила название «ультрафиолетовой катастрофы».

Стараясь осмыслить излучение черного тела, немецкий физик Макс Планк объединил физику тепла и физику света. В науке Планк был пуристом, любившим возвращаться для вывода новых принципов к основам. Концепция энтропии и второе начало

термодинамики зачаровывали его. Их и уравнения Максвелла Планк считал выражением фундаментальных законов природы и поставил себе задачу — показать, как они связаны. А кроме того, он питал совершеннейшую веру в математику, — если уравнения говорят, что то-то и то-то истинно, значит, так оно и есть, пусть даже все остальные с этим не согласны.

Чтобы заставить свои уравнения работать, Планк с неохотой, но использовал один хитроумный прием. Ему пришло в голову применить для электромагнитного излучения тот же подход, какой специалисты по термодинамике используют, описывая теплоту. Температура возникает при распределении тепловой энергии между множеством частиц — вот и Планк описал свет как распределение электромагнитной энергии по набору электромагнитных осцилляторов, или крошечных элементарных частиц электромагнитного поля.

А чтобы привести в порядок математическую сторону дела, Планк поставил энергию каждой электромагнитной частицы в зависимость от ее частоты  $E = h\nu$ , где  $E$  — энергия,  $\nu$  — частота света, а  $h$  — масштабный коэффициент, известный ныне как постоянная Планка. Сами частицы он назвал «квантами», от латинского «как много».

В новой энергетической картине каждый высокочастотный электромагнитный осциллятор обладает большой энергией. Стало быть, в любой системе их не может быть много, иначе будет превышена предельная энергия. Подобным же образом, если вы получаете месячное жалование сотней банкнот разного достоинства, большая их часть будет иметь достоинство среднее, а число крупных и мелких купюр окажется небольшим. Исходя из наиболее вероятного распределения электромагнитной энергии между множеством осцилляторов, Планк в своей модели отдал наибольшую часть энергии средним частотам — что отвечало пику спектра излучения черного тела. В 1901 году он опубликовал этот закон, связующий световые волны с вероятностью, и заслужил всеобщее одобрение. Как вскоре было показано, новая идея позволяла разрешить и проблему «ультрафиолетовой катастрофы».

Планковские кванты были всего лишь приемом, позволявшим подкрепить его закон математически, Планку и на миг не пришло в голову, что эти осцилляторы реальны. Однако то было время, когда происходило быстрое развитие атомной физики, и новая идея Планка нашла применения самые удивительные. Он посеял семя, из которого еще предстояло вырасти одной из самых важных компонент современной физики — квантовой теории.

## В сухом остатке Энергетический бюджет

# 24 Фотоэлектрический эффект

Падая на медную пластину, ультрафиолетовый свет порождает электрический ток. Этот «фотоэлектрический» эффект оставался загадкой до тех пор, пока вдохновленный Максом Планком Альберт Эйнштейн не додумался до идеи частицы света, или фотона. Эйнштейн показал, каким образом свет может вести себя и как поток шариков, и как непрерывная волна.

На заре XX века физика обзавелась новыми воззрениями. Уже в XIX веке было хорошо известно, что ультрафиолетовый свет возбуждает электроны металла, заставляя их создавать ток, и понимание этого явления привело физиков к изобретению совершенно нового языка.

**Голубые батареи** Фотоэлектрический эффект генерирует электрический ток в металле, если на металл падает голубой или ультрафиолетовый свет, — но не красный. Даже очень яркий луч красного света тока не создает. Заряды начинают движение, лишь когда частота света превышает некоторый порог, свой для каждого металла. Наличие порога указывает, что для смещения зарядов необходимо определенное количество энергии. Возбуждающая заряды энергия должна поставляться светом, однако под конец XIX века механизм происходящего все еще оставался непонятным.

Электромагнитные волны и движущиеся заряды считались совершенно разными физическими явлениями, и то, как они связаны, представлялось крайне загадочным.

«У каждого вопроса есть две стороны»

Протагор, 485–421 до н. э.

**Фотоны** В 1905 году Альберт Эйнштейн выдвинул радикальную идею, которая позволила объяснить фотоэлектрический эффект. Именно за эту работу, а не за создание теории относительности его удостоили в 1921-м Нобелевской премии. Вдохновленный квантами, которые

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1839

Александр Беккерель наблюдает фотоэлектрический эффект

1887

Герц измеряет электрические заряды, вызванные ультрафиолетовым светом

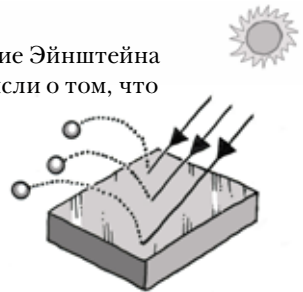
1899

Дж. Дж. Томсон подтверждает, что падающий свет генерирует электроны

ввел Макс Планк для описания энергетического бюджета «горячих» атомов, Эйнштейн позаимствовал планковское математическое определение кванта, пропорциональность энергии частоте, их связь посредством постоянной Планка, однако применил все это не к атому, но к свету. Впоследствии световые кванты Эйнштейна были названы «фотонами». Фотоны не обладают массой и движутся со скоростью света.

Вместо того чтобы рассматривать металл, непрерывно омываемый волнами света, Эйнштейн предположил, что отдельные фотоны ударяют, как пули, в электроны металла и приводят их в движение, что и порождает фотоэлектрический эффект. Поскольку каждый фотон несет некоторую энергию, пропорциональную его частоте, постольку и энергия получившего удар электрона также пропорциональна частоте света. Фотон красного света (имеющий низкую частоту) не обладает энергией, достаточной для того, чтобы сорвать электрон с занимаемого им места, зато фотон голубого цвета (более высокая частота) имеет большую энергию и потому способен привести электрон в движение. Увеличение яркости света ничего не даст. Это все равно что обстреливать шариками настольного тенниса тяжелый автомобиль. Эйнштейновская идея кванта света поначалу оставалась непопулярной, поскольку противоречила его волновому описанию, суммированному в уравнениях Максвелла, к которым большинство физиков относилось с великим почтением. Однако все изменилось, когда истинность безумной идеи Эйнштейна была доказана экспериментально. Опыты подтвердили пропорциональность энергии высвобождаемых электронов частоте падающего света.

**Корпускулярно-волновой дуализм** Предположение Эйнштейна было не только спорным, оно приводило к весьма неудобной мысли о том, что свет является и волной, и частицей сразу. Ко времени, когда Максвелл записал свои уравнения, свет неизменно вел себя как волна — огибал препятствия, рассеивался, отражался и интерферировал. Эйнштейн же возмутил спокойствие физиков, показав, что свет является также и потоком фотонных торпед.



Физики и поныне пытаются бороться с этой двойственностью.

Но сейчас нам уже известно, что свет, похоже, сам знает, какое поведение ему следует избирать в различных обстоятельствах — корпускулярное или волновое. Если вы ставите опыт по измерению волновых свойств света, например, пропускаете его сквозь дифракционную решетку, он ведет себя как волна. Если же вы вместо этого пытаетесь измерить его корпускулярные свойства, он подобным же образом идет вам навстречу.

**1901**

Планк вводит понятие кванта энергии

**1905**

Эйнштейн выдвигает теорию световых квантов

**1924**

Де Бройль высказывает предположение, что частицы могут вести себя как волны



### Альберт Эйнштейн, 1879–1955

Год 1905-й был годом чудес для родившегося в Германии физика, который работал на половинном жалованье чиновником швейцарского патентного бюро. Альберт Эйнштейн опубликовал в немецком журнале *Annalen der Physik* три статьи. Одна содержала объяснение броуновского движения, другая — фотоэлектрического эффекта, третья описывала специальную теорию относительности, и каждая была принципиально новой. Репутация Эйнштейна росла, а опубликованная им

в 1915 году общая теория относительности подтвердила, что он — один из величайших физиков всех времен. Четыре года спустя наблюдения, произведенные во время солнечного затмения, подтвердили истинность общей теории относительности и Эйнштейн обрел мировую славу. В 1921-м он получил Нобелевскую премию за посвященную фотоэлектрическому эффекту работу, которая оказала большое влияние на развитие квантовой физики.

**Квантовая энергия проникает под поверхностный слой физического тела и, по крайней мере частично, преобразуется в кинетическую энергию электронов. В простейшем случае квант света передает единичному электрону всю свою энергию**

Альберт Эйнштейн, 1905

Физики пытались придумать хитроумные эксперименты, которые поймают свет врасплох, заставят его обнаружить свою истинную природу, однако до сей поры ничего у них не вышло. Многие из этих экспериментов были вариантами опыта Юнга с двумя прорезями, однако в них использовались компоненты, которые можно было включать и выключать. Представьте себе источник света, лучи которого проходят через две узкие прорези и падают на экран. Когда обе прорези открыты, вы видите привычные темные и светлые полосы интерференционного рисунка. То есть свет, что нам давно известно, ведет себя как волна. Давайте, однако, будем уменьшать силу света до того, что на каком-то уровне он обратится просто в отдельные фотоны, проходящие через щели один за другим, — а детектор будет фиксировать их, когда они достигают экрана. Так вот, даже в этом случае фотоны будут по-прежнему создавать на экране полосатый интерференционный рисунок.

Но откуда же отдельный фотон знает, через какую прорезь ему проходить, чтобы создавать интерференционный рисунок? Если вы достаточно быстрые, то можете

перекрыть одну из прорезей после того, как фотон покинет источник света, — и даже после того, как он пройдет через прорези, но еще не успеет добраться до экрана. Так вот, во всех случаях, которые физикам удалось проверить, фотоны знали, проходя через прорези, сколько их открыто — одна или две. И даже когда полет совершали единичные фотоны, выглядело все так, точно каждый из них проходит одновременно через обе прорези.

Поместите детектор в одну из прорезей (чтобы знать, прошел фотон через нее или через соседнюю прорезь), и, как это ни странно, интерференционный рисунок исчезнет — фотоны будут падать на экран, не создавая полосок. То есть получается, что как фотоны ни подлавливай, они знают, как им себя вести. И ведут — как частицы и волны одновременно, но никогда как либо одно, либо другое.

**Волны материи** В 1924 году Луи-Виктор де Бройль выдвинул предположение обратного характера: частицы материи также могут вести себя как волны. По его мысли, каждое физическое тело обладает соответствующей ему длиной волны, то есть дуализм частица-волна становится универсальным. Три года спустя идея материи-волны была подтверждена — удалось пронаблюдать дифракцию и интерференцию электронов. К настоящему времени уже проведены наблюдения волнового поведения частиц более крупных — нейтронов, протонов, а недавно и молекул, и микроскопических «футбольных мячей» из молекул углерода, или «бакиболов». Объекты более крупные, к примеру шарики подшипников, обладают совсем уже маленькими длинами волн, увидеть такие волны невозможно, а потому и наблюдать волновое поведение этих объектов не удастся. Летящий над кортом теннисный мяч обладает длиной волны в  $10^{-34}$  метров, намного меньшей диаметра протонов ( $10^{-15}$  м).

Теперь, когда мы увидели, что свет есть также и поток частиц, а электроны порой оказываются волнами, фотоэлектрический эффект проделал полный круг.

## Солнечные батареи

Сегодня фотоэлектрический эффект используется в панелях солнечных батарей, в которых свет высвобождает электроны, только состоят эти батареи, как правило, не из металла, а из полупроводниковых материалов наподобие кремния.

# В сухом остатке Фотонные пули

# 25 Уравнение Шредингера

**Как указать местоположение частицы, если она ведет себя как волна и потому размазана по пространству? Эрвин Шредингер вывел уравнение, описывающее вероятность того, что частица-волна находится в определенном месте. Это уравнение позволило проиллюстрировать энергетические уровни электронов в атомах и заложило основы современной химии, равно как и квантовой механики.**

Согласно Эйнштейну и Луи Виктору де Бройлю, частицы и волны тесно взаимосвязаны. Электромагнитные волны, в том числе и свет, обладают характеристиками и волны, и частицы, и даже молекулы и элементарные частицы материи могут рассеиваться и интерферировать как волны.

Однако волны непрерывны, а частицы нет. Так как же сказать, где находится частица, если она распространяется в виде волны? В 1926 году австрийский физик Эрвин Шредингер с помощью физики волн и теории вероятностей вывел уравнение, которое описывает вероятность того, что ведущая себя как волна частица находится в определенном месте. Это уравнение — один из краеугольных камней квантовой механики, физики атомного мира.

Первоначально уравнение Шредингера использовалось для описания положения электронов в атомах. Шредингер постарался изобразить волновое поведение электронов с учетом введенной Максом Планком концепции кванта энергии — идеи о том, что энергия волны поступает в виде базовых строительных блоков и собственная энергия каждого из них пропорциональна частоте волны. Кванты — это наимельчайшие

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1897**

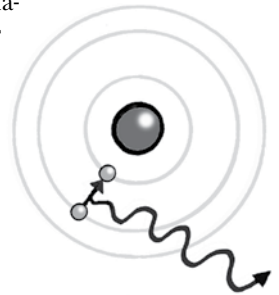
Дж. Дж. Томсон  
открывает электрон

**Атом Бора** Идею квантованной энергии применил к электронам атома датский физик Нильс Бор. Поскольку электроны легко отделяются от атомов и обладают отрицательным зарядом, Бор решил, что их можно уподобить планетам, вращающимся по своим орбитам вокруг Солнца. Однако электроны могут обладать лишь определенными количествами энергии, кратными ее основному кванту. Для того чтобы электроны оставались внутри атома, эти энергетические состояния должны привязывать их к отдельным слоям (или «оболочкам»), связанным с энергией электронов. То есть получилась картина, в которой планеты могут двигаться только по определенным орбитам, согласно правилам распределения энергии.

Модель Бора оказалась очень успешной, особенно в объяснении простого атома водорода. Этот атом содержит всего один электрон, вращающийся вокруг одного протона, который образует ядро атома. Иерархия дискретных энергий Бора концептуально объясняет характерные длины волн, излучаемых и поглощаемых атомом водорода.

Тут все походит на подъем по лестнице: если электрон атома водорода получает приращение энергии, он может перескочить на более высокую ступеньку, или оболочку. Однако для этого электрон должен поглотить энергию фотона, обладающую в точности требуемым ему для перехода значением. Стало быть, чтобы повысить энергетический уровень электрона, необходима совершенно определенная частота. Никакие другие не подойдут. И наоборот, получив приращение энергии, электрон может затем соскочить на нижнюю ступеньку, испустив при этом фотон света той же самой частоты.

**Спектральные отпечатки пальцев** Сдвигая электроны вверх по энергетической лестнице, газ водород может поглощать наборы фотонов, обладающие частотами, которые отвечают границам запрещенных для электронов энергетических зон, лежащих между «ступеньками». Если сквозь такой газ пропустить белый свет, в его спектре появятся затемненные участки, поскольку частоты, отвечающие каждой «ступеньке», будут поглощены. Если же газ разогреет и его электроны начинают срывать с верхних ступенек вниз, на месте темных линий появятся яркие. Эти характерные для водорода энергии легко измеряются и подтверждают предсказания Бора. Такого рода линии, отвечающие характерным энергетическим уровням, создают любые атомы. То есть они подобны отпечаткам пальцев, позволяющим идентифицировать конкретные химические соединения.

**1913**

Бор выдвигает идею электронных орбит, окружающих ядра атомов

**1926**

Шредингер выводит волновое уравнение

**Волновые функции** Концепция энергетических уровней Бора хорошо работает для водорода, но хуже для других атомов, у которых и электронов побольше, и ядра потяжелее. Однако остается еще парадокс де Бройля, согласно которому электроны можно трактовать и как волны. То есть каждую электронную орбиту можно рассматривать как волновой фронт. Но это означает, что сказать, где электрон находится в любой заданный момент времени, невозможно.

Шредингер, вдохновленный идеей де Бройля, вывел уравнение, способное описать позицию частицы, демонстрирующей волновое поведение. Сделать это удалось лишь статистически, используя теорию вероятностей. Уравнение Шредингера стало фундаментальной частью квантовой механики.

## В ящике

Отдельная частица, свободно движущаяся в пространстве, обладает волновой функцией, которая выглядит как синусоидальная волна. Если же поместить ее в закрытый ящик, волновой функции придется спадать до нуля на стенках ящика и вне его, поскольку ни там, ни там частица находиться не может. Волновую функцию внутри ящика можно определить, рассмотрев допустимые для частицы энергетические уровни, или кванты энергии, которые всегда должны превышать ноль. Поскольку квантовая теория допускает лишь специфические энергетические уровни, в одних местах частица сможет находиться с большей вероятностью, чем в других, а кроме того, в ящике найдутся места, в которых частица ни в коем случае находиться не может, поскольку там ее волновая функция равна нулю. У систем более

сложных волновые функции выглядят как комбинации синусоидальных волн и других математических функций — точно так же музыкальный тон строится из многих гармоний. В обычной физике мы, воспользовавшись законами Ньютона, описали бы перемещение частицы в ящике как движение миниатюрного шарика. В любой момент времени мы точно знали бы, где находится частица и в каком направлении движется. Однако в квантовой механике мы можем говорить только о вероятности нахождения частицы в некотором месте и в некоторый момент времени, а поскольку при атомных масштабах энергия квантуется, у частицы появляются любимые, так сказать, места, в которых ее можно найти. Но точно сказать, где находится частица, мы не сможем, потому что она, ко всему прочему, еще и волна.

**По понедельникам, средам и пятницам Бог правит электромагнетизмом исходя из волновой теории, а по вторникам, четвергам и субботам им правит дьявол, использующий теорию квантовую**

**Сэр Уильям Брэгг, 1862–1942**

Шредингер ввел идею волновой функции, которая выражает вероятность нахождения частицы в данном месте и в данное время, включая в себя все, что мы можем об этой частице знать. Понять, что такое волновые функции, на редкость трудно, поскольку мы не имеем с ними дела в нашем обыденном опыте и сильно затрудняемся визуализировать их и даже истолковать философски.

Революционный шаг вперед, которым стало уравнение Шредингера, привел также к моделям электронных орбит в атомах. Существуют вероятностные контуры, очерчивающие области, в которых электроны могут находиться с 80–90% вероятности (другое дело, что с некоторой малой вероятностью они могут находиться в совершенно других местах). Эти контуры оказались не сферическими оболочками, как предсказывал Бор, но фигурами довольно растянутыми, наподобие колоколов или пончиков. В настоящее время химики используют эту информацию в молекулярной инженерии.

Уравнение Шредингера революционизировало физику, распространив идею дуализма волна-частица не только на атомы, но и на всю материю. Вместе с Вернером Гейзенбергом и другими Шредингера можно по праву считать одним из отцов-основателей квантовой механики.

**В сухом остатке  
И там, и здесь, но не везде**



# 26 Принцип неопределенности Гейзенберга

**Принцип Гейзенберга гласит, что скорость (или импульс) и положение частицы ни в какой момент времени узнать точно нельзя — чем точнее вы измеряете одну из этих величин, тем меньше можете узнать о другой. Вернер Гейзенберг показал, что сам акт наблюдения за частицей изменяет ее, делая точное знание невозможным. И потому ни прошлое, ни будущее поведение любой элементарной частицы предсказать с уверенностью нельзя. Детерминизм мертв.**

В 1927 году Гейзенберг обнаружил, что квантовая теория приводит к некоторым странным заключениям. Она подразумевает, что ни один эксперимент невозможно проводить в полной изоляции от его окружения, поскольку сам акт измерения сказывается на его результате. Гейзенберг выразил это в своем «принципе неопределенности»: невозможно одновременно измерить и положение, и импульс элементарной частицы (или, соответственно, ее энергию) в точный момент времени. Если вы знаете одну из этих величин, другая всегда остается неопределенной. В некоторых пределах изменить можно обе, однако чем жестче задаются эти пределы для одной величины, тем более свободными они становятся для другой. Такая неопределенность, утверждал Гейзенберг, является глубинным следствием квантовой механики — к отсутствию мастерства или точности измерений она никакого отношения не имеет.

**Неопределенность** Результат любого измерения содержит неопределенность. Если вы измерите рулеткой длину стола, то сможете сказать: она равна одному метру, но сказать лишь с точностью до миллиметра, потому что таково мельчайшее деление рулетки. То есть длина может составлять 99,9 см или 100,1 см – точнее вы этого не узнаете.

Счесть неопределенность следствием ограниченности измерительного прибора легко, однако Гейзенберг говорил совершенно о другом. О том, что вы никогда не сможете точно и одновременно узнать два показателя, импульс и положение частицы, каким бы точным ваш прибор ни был. Выглядит это так, словно вы, измеряя положение пловца в бассейне, никак не можете одновременно узнать и скорость его движения. Примерно оценить и то и другое удается, однако чем точнее вы устанавливаете одно, тем более неопределенным становится другое.

**Измерение** Как возникает эта проблема? Гейзенберг представил себе эксперимент, в котором измеряется движение элементарной частицы – скажем, нейтрона. При этом можно использовать подобие радара, электромагнитные волны которого будут отражать частица. Для достижения максимальной точности лучше выбрать гамма-лучи, обладающие очень малой длиной волны. Однако вследствие дуализма волна-частица, гамма-луч, падающий на нейтрон, будет вести себя как поток фотонных пуль. Частота у гамма-лучей очень высокая, стало быть, каждый фотон будет иметь довольно большую энергию. И когда тяжелый фотон ударит по нейтрону, скорость последнего изменится. А значит, даже если вам удастся определить положение нейтрона в момент удара, сам процесс измерения сделает его скорость неопределенной.

Если использовать фотоны «помягче», с более низкими энергиями, это позволит минимизировать изменение скорости, однако у таких фотонов длины волн будут большими, что и уменьшит точность определения положения нейтрона. И как бы вы ни оптимизировали эксперимент, одновременно выяснить и положение, и скорость вам не удастся. Это фундаментальное ограничение, которое выражается принципом неопределенности Гейзенберга.

Во время Второй мировой войны Гейзенберг возглавлял не увенчавшийся успехом немецкий проект создания атомного оружия. До сих пор не прекращаются споры о том, стала ли неспособность немцев создать атомную бомбу результатом намеренных действий ученых или следствием нехватки ресурсов. После войны союзники арестовали Гейзенберга и вывезли его, как и других немецких ученых, в Англию, но затем он снова вернулся к исследовательской работе в Германии.

1901

В законе Планка использованы статистические методы

1927

Гейзенберг публикует принцип неопределенности

### Вернер Гейзенберг, 1901–1976

Вернер Гейзенберг пережил в Германии две мировые войны. Во время Первой мировой он вступил — еще подростком — в молодежную организацию, которая пропагандировала здоровый образ жизни, физическое закалывание и работу на свежем воздухе. Летом Гейзенберг работал на фермах, находя также время для занятий математикой. Он поступил в Мюнхенский университет, изучал теоретическую физику и вскоре понял, что делить время между излюбленными своими загородными походами

и абстрактным миром науки становится все труднее. Окончив докторантуру, Гейзенберг занимал различные ученые посты, а поработав в Копенгагене, познакомился там с Эйнштейном. В 1925 году Гейзенберг создал начальную форму квантовой механики, получившую название «матричной механики», и эта работа принесла ему в 1932 году Нобелевскую премию. В наши дни он, прежде всего, известен благодаря сформулированному им в 1927-м принципу неопределенности.

То, что происходит в реальности, понять еще труднее, поскольку и элементарные частицы, и электромагнитные волны ведут себя и как волны, и как частицы одновременно. Определения положения, импульса, энергии и времени — все они лишь вероятностны. Уравнение Шредингера описывает вероятность того, что частица находится

$$\Delta x \Delta p > \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \Delta t > \frac{\hbar}{2}$$

**Принцип  
неопределенности  
Гейзенберга**

в определенном месте или имеет определенную энергию, — в соответствии с квантовой теорией, вероятность эта воплощается волновой функцией частицы, описывающей все ее свойства.

Гейзенберг работал над квантовой теорией примерно в то же время, что и Шредингер. Шредингер предпочитал иметь дело с волновыми сторонами субатомных систем, тогда как Гейзенберг исследовал дискретную природу энергии. Оба физика разработали способы описания квантовых систем в математическом соответствии со своими пристрастиями: Шредингер использовал математику волнового движения, а Гейзенберг — матрицы, или двумерные таблицы чисел, позволяющие записывать наборы свойств элементарных частиц.

И у матричной, и у волновой интерпретации имелись свои последователи, и каждая из двух групп считала, что другая заблуждается. Но в конечном счете они объединили усилия и создали совместное описание квантовой теории, названное «квантовой механикой». Именно пытаясь сформулировать ее уравнения, Гейзенберг и обнаружил неопределенности, избавиться от которых невозможно. И в 1927 году описал их в письме к коллеге Вольфгангу Паули.

**«Чем с большей точностью определяется в какой-то момент времени положение, тем с меньшей точностью становится известным импульс — и наоборот»**

**Вернер Гейзенберг, 1927**

**Индетерминизм** Глубокие следствия принципа неопределенности не прошли мимо внимания Гейзенберга, указавшего на вызов, который этот принцип бросает привычной физике. Во-первых, из него вытекает, что прошлое поведение элементарной частицы ничем не ограничивалось до того, как она подверглась измерению. Согласно Гейзенбергу, «путь обретает существование, лишь когда мы приступаем к наблюдению за ним». Знать, где находится что бы то ни было, невозможно, пока мы не беремся его измерить. Гейзенберг отметил также, что и будущий путь частицы предсказать нельзя. Вследствие неопределенности положения и скорости частицы, будущее ее непредсказуемо.

Оба этих утверждения привели к расколу в тогдашней ньютоновской физике, полагавшей, что внешний мир существует независимо от нас, а задача наблюдателя состоит в том, чтобы экспериментально выявить законы этого мира. Квантовая же механика показала, что на атомном уровне такие детерминистические воззрения бессмысленны. Мы не можем больше говорить о причине и следствии, только о вероятностях. Эйнштейну и многим другим принять такие воззрения было трудно, однако им пришлось согласиться с тем, что именно они из уравнений и вытекают. Впервые за всю ее историю физика вышла за границы лабораторного эксперимента и вступила в царство абстрактной математики.

**Суть идеи**  
**Знай свои пределы**

# 27 Копенгагенская интерпретация

Уравнения квантовой механики дают ученым правильные ответы, но что они, собственно, означают? Датский физик Нильс Бор разработал «копенгагенскую интерпретацию» квантовой механики, объединив волновое уравнение Шредингера с принципом неопределенности Гейзенберга. Бор показал, что такого понятия, как изолированный эксперимент, попросту не существует, — результаты квантовых экспериментов определяются вмешательством наблюдателя. Проделав это, он поставил под сомнение саму объективность науки.

В 1927 году назрел раскол между физиками, которые придерживались противоположных взглядов на квантовую механику. Эрвин Шредингер доказывал, что основу квантового поведения составляет волновая физика и все оно может быть описано с помощью волновых уравнений. Напротив, Вернер Гейзенберг считал, что первостепенное значение для понимания природы имеет корпускулярная природа электромагнитных волн, которую описывает его матричное представление. Кроме того, Гейзенберг показал, что вследствие присущей всем параметрам, которые описывают движение элементарной частицы, неопределенности и прошлое, и будущее остаются непознаваемыми до тех пор, пока они не фиксируются наблюдением.

Объединить все эксперименты и теории в единую, дающую полное объяснение, картину попытался еще один человек. Им был Нильс Бор, глава факультета, на котором работал в Копенгагене Гейзенберг, — тот самый ученый, который описал квантовые энергетические состояния электронов в атоме водорода. Вместе с Гейзенбергом, Максом Борном и другими Бор разработал целостную концепцию квантовой механики, названную «копенгагенской интерпретацией». Она и поныне остается

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1901

Планк публикует закон излучения черного тела

1905

Эйнштейн использует кванты света для объяснения фотоэлектрического эффекта

### Нильс Бор, 1885–1962

Нильс Бор пережил две мировые войны и успел поработать с некоторыми из лучших физиков своего времени. Молодой Нильс изучал физику в Копенгагенском университете, где студентом, в лаборатории физиологии, которую возглавлял его отец, ставил физические эксперименты, отмеченные наградами. Защитив докторскую диссертацию, он перебрался в Англию, но не поладил с Дж. Дж. Томсоном. Поработав в Манчестере у Эрнеста Резерфорда, Бор возвратился в Копенгаген и завершил там работу по описанию «атома Бора»

(модели, которая и поныне составляет основу представлений большинства людей об атоме). В 1922 году, еще до настоящего возникновения квантовой механики, он получил Нобелевскую премию. В 1930-х ученые, бежавшие из гитлеровской Германии, находили пристанище в Институте теоретической физики Бора, который селил их в доме, пожертвованном датской пивоваренной компанией «Карлсберг». Когда же в 1940-м нацисты оккупировали Данию, Бор бежал из страны на рыбацьем суденышке в Швецию, а затем в Англию.

излюбленной интерпретацией у большинства физиков, хотя со времени ее создания предлагались и другие варианты.

**Две стороны** Нильс Бор избрал для трактовки новой науки философский подход. В частности, он особо подчеркнул воздействие наблюдателя на исход квантового эксперимента. Для начала он выдвинул принцип «дополнительности», согласно которому волновая и корпускулярная стороны материи и света суть два лица одного и того же явления, а не два различных семейства событий. Примерно так же картинки, которые используются при психологическом тестировании, могут меняться в зависимости от того, как вы на них смотрите, — две извилистые линии выглядят либо как ваза, либо как два обращенных один к другому профиля, — вот и волновые и корпускулярные свойства суть дополняющие друг друга способы рассмотрения одного и того же явления. Свет своей природы не меняет, меняется наш способ его рассмотрения.

Для того чтобы перекинуть мост через пропасть, которая разделяет квантовую систему и обычную, включающую наш обыденный опыт, Бор ввел «принцип соответствия», согласно которому для больших, всем нам знакомых систем квантовое поведение исчезает и начинает работать Ньютонова физика.

## 1927

Гейзенберг публикует принцип неопределенности  
Формулируется копенгагенская интерпретация



**Непознаваемость** Бор понял особую важность принципа неопределенности, который утверждает, что невозможно одновременно измерить и положение, и импульс (или скорость) любой элементарной частицы. При точном измерении одной величины другая непременно оказывается неопределенной. Гейзенберг считал, что эта неопределенность является результатом самого механизма измерения. Чтобы измерить некий объект — да и просто чтобы увидеть его, — нам приходится бомбардировать его фотонами света. А это всегда подразумевает передачу некоторого импульса или энергии, и потому наблюдение возмущает начальное движение объекта.

**Мы находимся в джунглях и отыскиваем путь методом проб и ошибок, оставляя за собой проложенную нами дорогу ?**

**Макс Борн, 1882–1970**

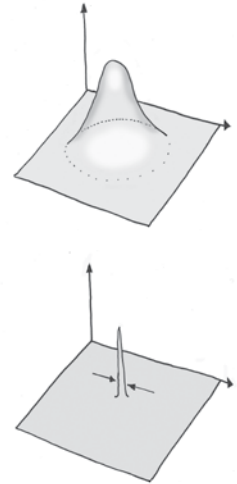
Бор же, со своей стороны, полагал, что объяснение Гейзенберга не лишено изъянов. Бор доказывал, что невозможно полностью отделить наблюдателя от системы, которую он промеряет. Именно сам акт наблюдения определяет конечное поведение системы, и причина тут не в простом переносе энергии, но в корпускулярно-волновой природе квантовой физики. Бор считал, что любая система должна рассматриваться как целое: невозможно отделить частицу

ни от «радара», ни от самого наблюдателя. Даже глядя на обычное яблоко, мы должны учитывать квантовые свойства системы в целом, включая систему зрения, посредством которой наш мозг обрабатывает отраженные яблоком фотоны.

Само слово «наблюдатель», считал Бор, ошибочно, поскольку создает образ зрителя, внешнего по отношению к наблюдаемой им системе. Фотограф наподобие Анселя Адамса может, конечно, снимать девственные красоты не тронутой человеком природы Йосемита, но, сказать по правде, такая уж ли она «нетронутая»? Если она нетронутая, то спрашивается, как туда попал фотограф? Подлинная картина содержит природу и человека в ней — *в ней*, а не отдельно от нее. По Бору, наблюдатель есть весьма значительная часть эксперимента.

Эта концепция участия наблюдателя в эксперименте шокировала физиков, поскольку она подвергала сомнению саму суть науки, фундаментальные представления о ее объективности. Заартачились и философы. Оказывается, природа вовсе не механистична и предсказуема, но по глубинной сути ее непознаваема. И что это означает для таких концепций, как объективная истина, не говоря уж о понятиях попроще — наподобие прошлого и будущего? Эйнштейну, Шредингеру и другим трудно было отказаться от их твердой веры во внешнюю, детерминистическую, доступную экспериментальной проверке вселенную. Эйнштейн вообще считал, что квантовая механика — вследствие ее статистической природы, — по меньшей мере, не полна.

**Редуцирование волновой функции** Ну хорошо, мы наблюдаем элементарные частицы и волны как либо одно, либо другое, но что именно определяет характер их проявления в том или ином качестве? Почему в понедельник свет, проходящий через две прорези, интерферирует, как положено волне, а во вторник, когда мы решаем засечь фотоны, пролетающие через одну из прорезей, переключается на поведение корпускулярное? Согласно Бору и сторонникам «копенгагенской интерпретации», свет существует одновременно в обоих состояниях — и как волна, и как частица. Но в процессе измерения притворяется либо тем, либо другим. Решая, как будет проводиться измерение, мы сами загодя выбираем то, что увидим.



Принято говорить, что в момент принятия решения, фиксирующего поведение того, что мы будем наблюдать — частицу или волну, — происходит редуцирование, или коллапс, волновой функции. Все содержащиеся в шредингеровском описании волновой функции вероятности конечного результата измерения отсекаются, остается лишь тот результат, какой мы пожелали увидеть. То есть, согласно Бору, исходная волновая функция луча света содержит в себе все возможности, все обличия — волновые и корпускулярные. Но когда мы измеряем этот луч, он предстает в одном из них — и не потому, что переходит от одной своей сущности к другой, но лишь потому, что обладает ими обеими одновременно. Квантовые яблоки и апельсины суть не то и не другое, а просто-напросто гибрид одного с другим.

Интуитивное понимание квантовой механики и сейчас дается физикам не без труда, поэтому со времен Бора были предложены новые способы ее толкования. Бор говорил, что для понимания квантового мира мы должны вернуться к школьной доске, отказаться от использования концепций, знакомых нам по обыденной жизни. Квантовый мир есть нечто иное, странное и непривычное, — и с этим необходимо смириться.

**«Всякий, кого не шокирует квантовая теория, ничего в ней не понял»**

**Нильс Бор, 1885–1962**

**В сухом остатке  
Выбор за вами**

# 28 Кот Шредингера

**Кот Шредингера может быть и живым и мертвым сразу. В гипотетическом эксперименте Шредингера кот сидит в ящике с капсулой яда, которая может убить беднягу, а может и не убить, все зависит от случайным образом срабатывающего пускового механизма. Эрвин Шредингер использовал эту метафору, чтобы показать, насколько нелепой представляется ему копенгагенская интерпретация квантовой теории. Согласно ей, пока мы не увидим действительный исход эксперимента, кот должен пребывать в своего рода чистилище, оставаясь сразу и живым и мертвым.**

Согласно копенгагенской интерпретации квантовой теории, квантовые системы существуют как облака вероятностей — до тех пор, пока наблюдатель не щелкнет выключателем и не выберет предпочтительный результат проводимого им эксперимента. Прежде чем подвергнуться наблюдению, система содержит все возможности. Свет остается и волной, и частицей до тех пор, пока мы не решаем, какое его свойство хотим измерить, — тогда он и принимает потребную нам форму.

Если для таких абстрактных сущностей, как фотон или световая волна, облако вероятностей еще и может считаться концепцией правдоподобной, то что оно должно означать для объектов более крупных, осязаемых нами? Какова природа этой квантовой расплывчатости?

В 1935 году Эрвин Шредингер публикует статью, в которой описывает гипотетический эксперимент, иллюстрирующий такое поведение системы на примере более красочном. Шредингер относился к копенгагенским воззрениям, согласно которым сам акт наблюдения воздействует на поведение системы, крайне критически. И постарался показать, насколько глупа копенгагенская интерпретация.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1927**

Копенгагенская интерпретация квантовой механики

**1935**

Шредингер описывает эксперимент с квантовым котом

**Квантовое чистилище** Шредингер рассматривает следующую ситуацию, чисто гипотетическую, конечно. Ни одно животное не пострадало.

*Некий кот заперт в стальной камере вместе с адской машиной (которая должна быть защищена от прямого вмешательства кота): внутри счетчика Гейгера находится крохотное количество радиоактивного вещества, столь небольшое, что в течение часа может распасться только один атом, но с такой же вероятностью может и не распасться; если же это случится, считывающая трубка разряжается и срабатывает реле, спускающее молот, который разбивает колбочку с синильной кислотой. Если на час предоставить всю эту систему самой себе, то можно сказать, что кот будет жив по истечении этого времени, коль скоро распада атома не произойдет. Первый же распад атома отравил бы кота.*



Итак, по прошествии часа, перед тем как ящик откроют, должны существовать вероятности — 50 на 50 — того, что кот либо жив (будем надеяться), либо мертв. Шредингер показывает, что, следуя логике копенгагенской интерпретации, мы, пока ящик остается закрытым, должны представлять себе кота как пребывающего в комбинации обоих состояний, живого и мертвого одновременно. Точно так же, как волновая или корпускулярная природа электрона фиксируется лишь в момент его детектирования, будущее кота определяется лишь в тот миг, когда мы решаем открыть ящик и заглянуть в него. Открывая, мы производим наблюдение и устанавливаем его результат.

Разумеется, недовольно ворчал Шредингер, выглядит это нелепо, в особенности для настоящего живого кота. Мы знаем из повседневного опыта, что кот может быть либо живым, либо мертвым, никакие смеси тут невозможны, и было бы безумием воображать, что, пока мы не смотрели на него, он пребывал в некоем подобии чистилища. Если кот жив, он будет помнить только, как он сидел, живехонький, в ящике и ни в малой мере не был ни облаком вероятностей, ни волновой функцией.

Эйнштейн, как и многие другие, был согласен со Шредингером в том, что копенгагенская картина нелепа. Вместе они выдвинули еще несколько вопросов. Мог ли кот, как животное, наблюдать сам за собой и тем редуцировать собственную волновую функцию? Что вообще требуется, чтобы стать наблюдателем? Должен ли наблюдатель быть сознательным существом, подобным человеку, или для этой роли сгодится любое животное? А как насчет бактерий?

**1957**

Эверетт выдвигает гипотезу многих миров

### Эрвин Шредингер, 1887–1961

Австрийский физик Эрвин Шредингер занимался квантовой механикой и вместе с Эйнштейном пытался (безуспешно) объединить гравитацию и квантовую механику в единую теорию. Он отдавал предпочтение волновым интерпретациям и неприязненно относился к корпускулярно-волновому дуализму, что привело его к конфликту с другими физиками. В юности Шредингер увлекался немецкой поэзией, но тем не менее решил заняться в университете теоретической физикой. Во время Первой мировой войны он служил на итальянском фронте, не прекращая, впрочем, работать и даже публикуя статьи, а после войны вернулся в ученый мир. В 1926 году Шредингер вывел свое волновое уравнение, за которое был удостоен в 1933-м Нобелевской премии, разделив ее

с Полом Дираком. Затем Шредингер перебрался в Берлин, чтобы занять в университете пост, покинутый Максом Планком, однако после прихода Гитлера к власти решил покинуть Германию. Осесть на одном месте ему оказалось трудно, он проработал некоторое время в Оксфорде, Принстоне, а затем в австрийском Граце. В 1938 году, после аннексии Австрии, Шредингер снова бежал, на этот раз в Ирландию, где занял в дублинском Институте передовых исследований специально для него созданный пост. Там он и оставался до возвращения в Вену. Личная жизнь Шредингера была не менее сложной, чем профессиональная; у него имелись дети от нескольких женщин, одна из них даже жила какое-то время в Оксфорде — вместе с ним и его женой.

Мы можем пойти еще дальше, спросив, а существует ли в мире что-либо, не зависящее от наших наблюдений за ним? Забудем про кота, подумаем о распадающейся радиоактивной частице, распадается она или нет, пока ящик остается закрытым? Или пребывает, пока мы не откроем крышку, в квантовом чистилище, как того требует копенгагенская интерпретация? Может быть, и весь мир находится в смешанном, расплывчатом состоянии и нет в нем ничего определенного, пока мы не бросим на него взгляд, заставляющий волновую функцию мира редуцироваться. Вот вы на выходные покидаете здание, в котором работаете, так оно что же — разваливается или его спасают от такой участи взгляды прохожих? А ваша дача рядом с лесом, она утрачивает реальное существование, когда никто на нее не смотрит? Поджидает ли она вас, находясь в смеси вероятностных состояний, в их наложении друг на друга, — а среди них присутствуют пожар, наводнение, вторжение муравьев и медведей — или все-таки мирно стоит, дожидаясь вашего приезда? Хотя, может быть, следует считать наблюдателями птиц и белок? Странная получается картина, но именно так копенгагенская интерпретация Бора и объясняет мир на уровне атомов.

**Множественные миры** Философская проблема, связанная с тем, как наблюдение определяет свой собственный результат, привела к появлению еще одной интерпретации квантовой теории — к гипотезе множественных миров. Предложенная в 1957 году Хью Эвереттом, она избегает неопределенности, связанной с еще не подвергшимися наблюдению волновыми функциями, постулируя взамен существование бесконечного числа параллельных вселенных. Всякий раз, как производится наблюдение и регистрируется его специфический результат, от нашей вселенной отпочковывается новая. Все они в точности одинаковы, за вычетом одного изменившегося в ходе наблюдения обстоятельства. То есть вероятности всех одинаковы, но осуществление событий проводит нас по череде ветвящихся вселенных.

Во множественных мирах кот Шредингера вовсе не должен быть суперпозицией всех возможных состояний. Просто в одной вселенной он жив, а в другой, параллельной, мертв. В одной вселенной колбочка с ядом разбилась, а в другой уцелела.

Насколько это лучше чистилища волновых функций, сказать трудно. Конечно, мы избавляемся от наблюдателя, который вытаскивал бы нас иногда из облака вероятностей, однако делаем это ценой существования альтернативных вселенных, и каждая из них лишь слегка отличается от другой. В одной вселенной я могу быть рок-звездой, а в другой — петь на улицах. В одной — носить чулки черные, а в другой — серые. Как-то это похоже на пустую трату множества добротных вселенных (а среди них вполне может попасться и такая, в которой люди одеваются без всякого вкуса). Впрочем, различия между вселенными могут быть и посерьезнее — в одной Элвис все еще жив, а в другой никто в Джона Ф. Кеннеди не стрелял. Эта идея широко использовалась в кино — довольно вспомнить фильм «Осторожно, двери закрываются», в котором Гвинет Пэлтроу проживает в Лондоне две жизни, одну счастливую, другую не очень.



Некоторые физики и по сей день считают, что рассуждения Шредингера относительно метафорического эксперимента с котом были ошибочными. Как это случилось и с его волновой теорией, Шредингер попытался применить привычные физические идеи к причудливому квантовому миру, в котором нам следует попросту смириться с присущими ему странностями.

**В сухом остатке  
Живой или мертвый?**



# 29 Парадокс ЭПР

Квантовая механика наводит на мысль, что информация может мгновенно передаваться между системами независимо от расстояний между ними. Это называется «квантовой запутанностью» и говорит о наличии огромной раскинувшейся по вселенной сети взаимосвязей между частицами. Эйнштейн, Подольский и Розен считали это нелепостью и оспорили такую интерпретацию в своем парадоксе. Однако эксперименты, показывающие, что «квантовая запутанность» существует, позволяют говорить о новых возможностях, открывающихся перед квантовой криптографией, компьютерными технологиями и даже телепортацией.

Альберт Эйнштейн так никогда и не принял копенгагенскую интерпретацию квантовой механики, согласно которой вплоть до момента наблюдения квантовые системы существуют в вероятностном чистилище, а после него принимают свое конечное состояние. Прежде чем наблюдение отфильтрует состояние системы, она существует как комбинация всех возможных состояний. Эйнштейна эта картина не удовлетворяла, он считал такие комбинации и смеси нереалистичными.

**Парадоксальные частицы** В 1935 году Эйнштейн вместе с Борисом Подольским и Натаном Розеном выразил свое недовольство в форме парадокса, названного «парадоксом Эйнштейна–Подольского–Розена», или «парадоксом ЭПР». Представим частицу, которая распадается на две другие. Если изначальная частица была неподвижной, дочерние должны обладать равными, противоположно

«**Я, во всяком случае, убежден, что Он [Бог] в кости не играет**»

Альберт Эйнштейн, 1926

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1927

Предлагается копенгагенская интерпретация

1935

Эйнштейн, Подольский и Розен формулируют свой парадокс

## Телепортация

Телепортация получила широкое распространение в научной фантастике. При появлении техники связи, например телеграфа в XIX веке, появились и надежды на возможность передачи на огромные расстояния и другой информации, не только электрических импульсов. В 1920-х и 1930-х телепортация начинает описываться в книгах, например Артура Конана Дойля, и становится обычной в научной фантастике. В «Мухе» Жоржа Ланжелана (трижды экранизированной) ученый телепортирует себя самого, но информация о его теле перемешивается с информацией о комнатной мухе, и он

обращается наполовину в человека, наполовину в химерическую муху. Не обошлось без телепортации и в культовом телесериале «Звездный путь» с его известной фразой «излучай меня, Скотти». Телепортер разбирает космический корабль «Энтерпрайз» на атомы, а затем собирает в прежнем виде. В реальной жизни телепортация считается невозможной из-за принципа неопределенности Гейзенберга. Но, хотя передача настоящих атомов невозможна, квантовая запутанность позволяет передавать на большие расстояния информацию, — правда, до сих пор это показано лишь для крошечных частиц.

направленными импульсом и моментом количества движения, чтобы сумма обоих оставалась равной нулю (поскольку эти показатели сохраняются). То есть новые частицы должны разлетаться и вращаться в противоположных направлениях. Подобным же образом связаны и другие квантовые свойства этой пары. Измерив направление вращения одной из них, мы сразу узнаем и направление вращения другой (противоположное), даже если времени после их рождения прошло много и разлетелись они очень далеко. Это то же самое, что выяснить цвет глаз одного из однояйцевых близнецов. Если глаза у него зеленые, мы сразу узнаем, что и у другого они тоже зеленые.

Пытаясь объяснить это с помощью копенгагенской интерпретации, вы скажете, что перед любыми измерениями обе частицы (или близнецы) существовали в виде суперпозиции обоих возможных состояний. Волновые функции частиц содержали информацию о них, вращающихся в каком угодно направлении; близнецы обладали смесью всех возможных расцветок глаз. Когда же мы проводим измерение одного из членов пары, происходит одновременная редукция волновых функций обоих. Эйнштейн,

### 1964

Джон Белл выводит неравенства для локальной реальности

### 1981–1982

Показано нарушение неравенств Белла, что свидетельствует о запутанности

### 1993

Квантовые биты получают название «кубиты»

Подольский и Розен заявили, что это бессмыслица. Как можно одновременно воздействовать на частицы, удаленные одна от другой? К тому времени Эйнштейн уже показал, что скорость света есть универсальный предел скоростей – быстрее света ничто перемещаться не может. Как же вторая частица узнает о том, что первую подвергли измерению? То, что измерение, проведенное на одном конце вселенной, может «мгновенно» воздействовать на материю, находящуюся на другом ее конце, должно свидетельствовать об ошибочности квантовой механики.

**Запутанность** В той же статье, где описывался парадокс с котом, Шредингер использовал слово «запутанность» для описания этого странного действия на расстоянии.

Бору существование во вселенной связи на квантовом уровне представлялось неизбежным. Эйнштейн же предпочитал верить в «локальную реальность», в локальную определенность знания о мире. Точно так же, как близнецы рождаются с глазами одного цвета, а не разгуливают, оставаясь, пока мы на них не взглянем, в расплывчатом многоцветном состоянии, пара частиц, полагал Эйнштейн, испускается в тех или иных направлениях, которые затем остаются фиксированными, и потому ни в связи на расстоянии, ни в роли наблюдателя никакой необходимости не существует. Эйнштейн выдвинул предположение о существовании неких скрытых переменных, ныне сформировавшиеся в «неравенства Белла», которые еще будут открыты и докажут его правоту, однако никаких свидетельств этого обнаружено так и не было.

Напротив, было показано, что эйнштейновская идея локальной реальности неверна. Эксперименты продемонстрировали существование квантовой запутанности даже для случая более чем двух частиц, разделенных многими километрами.

**Квантовая информация** Поначалу квантовая запутанность возникла как философский спор, однако сейчас она позволяет кодировать и передавать информацию способами, совершенно не похожими на существовавшие прежде. В обычных компьютерах информация кодируется в виде битов с фиксированными значениями двоичного кода. При квантовом кодировании используются два или более квантовых состояния, однако система может существовать также в виде композиции этих состояний. В 1993 году появился термин «кубит» (квантовая композиция битовых значений), и ныне на основе этих принципов проектируются квантовые компьютеры.

Спутанные состояния дают новые каналы связи между кубитами. Если производится измерение, оно приводит к каскаду дальнейшей квантовой связи между элементами системы.

Измерение одного элемента устанавливает наборы значений для всех остальных – такие эффекты полезны в квантовой криптографии и даже в квантовой телепортации.

Строго говоря, неопределенный характер квантовой механики запрещает телепортацию, какой она изображается в научной фантастике, где ученый считывает полную информацию о какой-то вещи и заново собирает ее в другом месте. Получить *всю* информацию из-за принципа неопределенности мы не можем. И потому телепортация человека — и даже мухи — невозможна. Однако использование запутанных систем делает возможным ее квантовый вариант. Если два человека, ученые часто называют их Алисой и Бобом, владеют парой спутанных фотонов, Алиса может произвести измерения на своем фотоне и тем самым перенести всю информацию о них на фотон Боба, и тогда последний станет неотличимым от ее оригинала, хоть и будет представлять собой репродукцию. Телепортация это или нет? Хороший вопрос. Никаких путешествий ни фотоны, ни информация не совершают — Алиса и Боб могут находиться на разных концах вселенной и тем не менее преобразовывать спутанные фотоны друг друга.

Квантовая криптография основана на использовании квантовой запутанности как связующего ключа кодировки. Получатель и адресат должны иметь в руках компоненты спутанной системы. Любое сообщение и уникальный код для его расшифровки отправляются адресату через связи этой спутанной системы. Тут есть важное преимущество: если сообщение будет перехвачено, любое измерение уничтожит его (изменит квантовое состояние), поэтому оно может использоваться только один раз и прочитываться только тем, кто точно знает, какие квантовые измерения следует выполнить, чтобы раскрыть сообщение с помощью ключа.

Запутанность говорит нам: полагать, что весь наш мир существует независимо и в одной форме безотносительно к производимым нами в нем измерениям, попросту неверно. Не существует такой вещи, как объект, фиксированный в пространстве, существует лишь информация о нем. Все, что мы можем, — это собирать информацию о нашем мире и упорядочивать ее нужным нам образом, позволяющим извлечь из нее какой-то смысл. Вселенная — это море информации; форма, которую мы ей придаем, вторична.

**«Похоже, принцип неопределенности связывает руки даже Богу и он не может знать сразу и местоположение, и скорость частицы. Так что же, играет Бог со вселенной в кости? Все указывает на то, что он — заядлый игрок, бросающий кости при каждой возможности»**

**Стивен Хокинг, 1993**

**В сухом остатке**  
**Мгновенное сообщение**

# 30 Принцип исключения Паули

Принцип исключения Паули объясняет, почему вещество жестко и непроницаемо, — почему мы не проваливаемся сквозь пол, а ладонь наша — сквозь поверхность стола. Кроме того, он «несет ответственность» за существование нейтронных звезд и белых карликов. Установленные Вольфгангом Паули правила применимы к электронам, протонам и нейтронам, то есть ко всей материи. Принцип утверждает, что никакие из этих частиц не могут одновременно иметь один и тот же набор квантовых чисел.

Что делает вещество столь жестким? Каждый атом — это по преимуществу пустое пространство, так почему же нельзя сжимать его, как губку, или протискивать одно вещество через другое, точно сыр через терку? Вопрос о том, почему вещество занимает некоторый пространственный объем, — один из фундаментальнейших вопросов физики. Не будь этого, все мы могли бы свалиться к центру Земли или провалиться сквозь полы, а здания рушились бы под собственной тяжестью.

**Не одно и то же** Принцип исключения, сформулированный Вольфгангом Паули в 1925 году, объясняет, почему атомы не могут занимать в пространстве одно и то же место. По мысли Паули, квантовое поведение атомов и частиц означает, что они должны следовать определенным правилам, запрещающим им обладать одной и той же волновой функцией или, соответственно, одними и теми же квантовыми свойствами. Паули сформулировал свой принцип, пытаясь объяснить поведение электронов в атомах. Было известно, что электроны предпочитают определенные

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1925**

Паули предлагает принцип исключения

**1933**

Происходит открытие нейтрона, предсказывается существование нейтронных звезд

энергетические состояния, или оболочки, окружающие ядра атомов. Однако электроны распределяются по этим оболочкам и никогда не собираются все вместе в оболочке с наименьшей энергией. Похоже, они заселяют свои оболочки, следуя определенным правилам, — вот эти-то правила Паули и вывел.

Точно так же, как ньютоновская физика находит свое выражение в понятиях силы, импульса и энергии, квантовая механика имеет собственный набор параметров. Квантовый спин, к примеру, аналогичен моменту количества движения, однако он проквантован и может принимать лишь определенные значения. Решение уравнения Шредингера требует для описания любой частицы четырех квантовых чисел — трех пространственных координат и спина. Правила Паули устанавливают, что никакие два электрона в атоме не могут обладать одной и той же четверкой квантовых чисел. Никакие два электрона не могут одновременно находиться в одном и том же месте и обладать одними и теми же свойствами. Поэтому, когда число электронов в атоме растет, а сам атом становится тяжелее, они занимают допустимые для них места и постепенно перемещаются во все более высокие оболочки. Это похоже на заполнение мест в маленьком театральном зале — от сцены к дальней стене.

**Фермионы** Правила Паули применимы ко всем электронам и иным частицам, квантовый спин которых имеет значение, кратное половине его основной единицы, что справедливо и для протонов с нейтронами. Такие частицы были названы «фермионами» — в честь итальянского физика Энрико Ферми. Фермионы обладают асимметричными волновыми функциями и могут, как следует из уравнения Шредингера, переходить из положительного состояния в отрицательное. Спин обладает еще и направлением, поэтому два фермиона могут соседствовать, если их спины направлены противоположно. Два электрона могут находиться в нижнем энергетическом состоянии, но только если их спины разнонаправлены.

Поскольку основные строительные блоки вещества — электроны, протоны и нейтроны — являются, все как один, фермионами, принцип исключения Паули диктует и поведение атомов. Ни одна из этих частиц не может разделить с другой квантовое энергетическое состояние, и это делает атомы по природе их жесткими. Электроны, распределенные по множеству энергетических оболочек, невозможно втиснуть в одну из них, самую близкую к ядру, они сопротивляются, и с немалой силой, такому сжатию. То есть два фермиона не могут сидеть в театральном зале на одном и том же месте.

**Квантовое сжатие** Белые карлики и нейтронные звезды обязаны принципу Паули самим фактом их существования. Когда звезда достигает конца своей жизни и у нее не остается больше топлива, которое она могла бы пережигать, начинается

1967

Открыт первый пульсар,  
тип нейтронной звезды



### Вольфганг Паули, 1900–1958

Вольфганг Паули более всего известен его принципом исключения и предсказанием существования нейтрино. Паули учился в Австрии и Германии, он был своего рода вундеркиндом — читал работы Эйнштейна и писал статьи по теории относительности. Гейзенберг описал его как «ночную птицу», работавшую в кафе и редко появлявшуюся на утренних лекциях. У Паули было немало личных проблем — самоубийство матери, короткий и неудачный брак, пристрастие к спиртному. Он обратился

за помощью к швейцарскому психиатру Карлу Юнгу, записавшему тысячи его сновидений. Жизнь Паули пошла в гору, когда он снова женился, но тут началась Вторая мировая война. Он работал в Соединенных Штатах, стараясь не дать угаснуть европейской науке, а после войны вернулся в Швейцарию и в 1945 году получил Нобелевскую премию. В поздние годы жизни он интересовался главным образом философскими аспектами квантовой механики и ее параллелями в психологии.



**Земля**



**Белый карлик**



**Нейтронная звезда**

процесс ее сжатия. Собственная огромная сила притяжения звезды стягивает к ее центру газовые слои, из которых она состоит. При этом какая-то часть газа может вырываться наружу (взрыв суперновой), однако уцелевшие «угли» испытывают еще большее сжатие. Расстояние между атомами уменьшается, и электроны пытаются противиться уплотнению. Они переходят на самые низкие энергетические оболочки, какие только могут занять, не нарушая принципа Паули, и одно только это «давление вырождения» поддерживает существование звезды. Белые карлики — это звезды, обладающие массой, близкой к массе Солнца, но сжатые в шар диаметром порядка радиуса Земли. Они настолько плотны, что кусочек их вещества размером с кубик сахара может весить целую тонну.

Для звезд с большей силой притяжения, в частности, для тех, чья масса превышает 1,4 массы Солнца (предел Чандрасекара), сжатие на этом не останавливается. Процесс продолжается, электроны и протоны могут сливаться, образуя нейтроны, и гигантская звезда превращается в плотный шар нейтронов.

И опять-таки, поскольку нейтроны являются фермионами, находясь в одном и том же квантовом состоянии они не могут. Давление вырождения по-прежнему удерживает

**Вопрос о том, почему все электроны атома в его основном состоянии не собираются на самых близких к ядру оболочках, уже был выделен Бором в качестве фундаментальной проблемы... классическая механика никаких объяснений этого явления дать не смогла**

**Вольфганг Паули, 1945**

звезду, однако на этот раз радиус ее составляет около десяти километров, — вся масса Солнца, а то и нескольких Солнц занимает пространство с диаметром, равным примерно длине Манхэтгена.

Нейтронные звезды плотны настолько, что состоящий из их вещества кубик сахара весит больше ста миллионов тонн. Если же сила тяжести продолжает сжимать звезду и дальше, а с очень большими звездами это случается, она в конечном счете обращается в черную дыру.

**Бозоны** Правила Паули относятся только к фермионам. Частицы со значениями спинов, кратными основной его единице, и симметричными волновыми функциями называются «бозонами» — в честь индийского физика Шатъендраната Бозе. Бозоны суть частицы, связанные с фундаментальными силами, к числу их относятся фотоны и некоторые симметричные ядра, например ядра гелия (содержащие два протона и два нейтрона). Любое число бозонов может находиться в одном и том же квантовом состоянии, а это способно привести их к скоординированному групповому поведению. Примером является лазер, в котором множество фотонов одного цвета действуют заодно.

Родившись на свет как расширение созданной Бором картины атома, принцип исключения Паули предварил основной этап развития квантовой теории, во главе которого стояли Гейзенберг и Шредингер. Однако он имеет фундаментальное значение для понимания атомного мира и, в отличие от многих особенностей квантовой механики, приводит к последствиям, которые мы в буквальном смысле можем потрогать руками.

**В сухом остатке  
Здесь не занято?**

# 31 Сверхпроводимость

При очень низких температурах некоторые металлы и сплавы проводят электричество без какого-либо сопротивления. Ток может протекать через такие сверхпроводники миллиарды лет, не теряя энергии. Электроны образуют пары и движутся совместно, они избегают столкновений, которые создают электрическое сопротивление, и их состояние близко к состоянию вечного движения.

Если охладить ртуть до температуры, всего на несколько градусов превышающей абсолютный ноль, она начинает проводить электричество без какого-либо сопротивления. Это явление обнаружил в 1911 году голландский физик Хейке Оннес, случайно уронив ртуть в жидкий гелий, имевший температуру 4,2 К. Не оказывавшая сопротивления току ртуть стала первым из открытых сверхпроводящих материалов. Вскоре выяснилось, что аналогичное поведение характерно и для других охлажденных металлов, в том числе для свинца, а также для таких химических соединений, как нитрид ниобия. Сопротивление полностью исчезает ниже определенной критической температуры, разной для разных материалов.

**Вечное движение** Из-за нулевого сопротивления ток, пропускаемый через сверхпроводник, может течь в нем вечно. В лабораторных условиях такие токи поддерживались в течение многих лет, — по оценкам физиков, должен пройти миллиард лет, прежде чем ток потеряет какую-то часть энергии. Ближе этого ученые к вечному движению еще не подходили.

**Групповое поведение** Физики долго ломали голову над вопросом о том, почему при низких температурах происходит столь серьезное изменение свойств вещества. Существование критической

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1911

Оннес открывает сверхпроводимость

1925

Предсказывается существование конденсатов Бозе—Эйнштейна

1933

Показывается, что сверхпроводники отталкивают магнитные поля

1940-е

Открытие сверхпроводящих химических соединений

## Сверхжидкости

Сверхжидкости — это жидкости, лишенные вязкости и потому способные течь по трубке вечно и без какого-либо трения. Сверхжидкости известны с 1930-х. Один из примеров — сверхохлажденный гелий-4 (атомный вес — два протона, два нейтрона и два электрона). Атомы гелия-4 являются бозонами, составленными из пар фермионов.

Помещаемые в сосуд, сверхжидкости ведут себя очень странно — они могут течь по стенке сосуда вверх слоем толщиной в один атом. Если ввести в сверхжидкость капилляр и нагреть его, получится фонтан, поскольку

сверхжидкость неспособна удерживать температурный градиент (она обладает бесконечной теплопроводностью), а тепло мгновенно создает изменение давления. Если начать вращать ведро со сверхжидкостью, также произойдет нечто странное. Поскольку вязкость отсутствует, жидкость сразу же вращаться не станет, но останется неподвижной. Однако при увеличении скорости вращения ведра и достижении ею некоторого критического значения сверхжидкость внезапно начинает вращаться тоже. Но скорость ее вращения будет квантованной — у сверхжидкости она может принимать лишь определенные значения.

температуры наводит на мысль о быстром фазовом переходе, поэтому физики стали присматриваться к квантовому поведению электронов в металле. Квантовая механика дала им кое-какие ключи, и в 1950-х начали выдвигаться определенные идеи. В конце концов американские физики Джон Бардин, Леон Купер и Джон Шриффер предложили убедительное и полное объяснение сверхпроводимости в металлах и простых сплавах, называемое ныне теорией БКШ. В ее основе лежит предположение о том, что сверхпроводимость возникает вследствие причудливого поведения объединяющихся в пары электронов.

Электронные пары, называемые «парами Купера», взаимодействуют с решеткой атомов металла посредством вибраций, которые удерживают их вместе. Металл — это решетка положительно заряженных ядер, вокруг которых плещется «море» свободных электронов. Когда металл сильно охлаждается, решетка становится неподвижной, проходящий через нее отрицательно заряженный электрон слегка притягивает к себе положительно

**1957**

Формулируется теория сверхпроводимости БКШ

**1986**

Создаются высокотемпературные сверхпроводники

**1995**

В лабораторных условиях создаются конденсаты Бозе—Эйнштейна

## Конденсаты Бозе–Эйнштейна

Группы бозонов ведут себя при сверхнизких температурах очень странно. В окрестностях абсолютного нуля множество бозонов может переходить в одно и то же квантовое состояние и демонстрировать квантовое поведение на макроскопическом уровне. Впервые предсказанные в 1925 году Альбертом Эйнштейном, который исходил из идей индийского физика Шатъендраната Бозе, так называемые конденсаты Бозе–Эйнштейна (КБЭ) были получены в лабораторных условиях только в 1995-м. Эрик Корнелл и Карл Виман из Колорадского университета, а несколько позже Вольфганг Кеттерле из МТИ наблюдали соответствующее поведение у газа, образованного из атомов рубидия

и охлажденного до 170 миллиардных градуса Кельвина. Все атомы КБЭ имеют одну скорость, лишь слегка размазанную принципом неопределенности Гейзенберга. КБЭ ведут себя как сверхжидкость. Бозонам позволено находиться в одном и том же квантовом состоянии, и Эйнштейн пришел к заключению, что при охлаждении до температуры намного ниже критической все они могут перейти («сконденсироваться») в квантовое состояние с самой низшей энергией, создав новую форму материи. КБЭ очень неустойчивы, поэтому говорить об их практическом применении пока рано, однако они способны многое сказать нам о квантовой механике.

заряженные узлы решетки, создавая в ней подобие ряби. Еще один движущийся вблизи первого электрон может оказаться втянутым в эту область чуть более сильного положительного заряда, в результате возникнет связанная пара электронов. Второй электрон будет следовать за первым. Это происходит с электронами по всему металлу, и синхронизированные электронные пары создают структуру движущейся волны.

Единичный электрон обязан следовать принципу исключения Паули, который запрещает частицам с асимметричными волновыми функциями (фермионам) разделять друг с другом одно и то же квантовое состояние. Поэтому там, где электронов много, где они собраны в ограниченном пространстве, все они должны обладать различными энергиями. Что обычно и имеет место в атоме или в металле. Однако, когда электроны образуют пары, ведущие себя как отдельная частица, поведение их меняется. Волновая функция пары становится симметричной, это уже не фермион, а бозон. И как любые бозоны, электронные пары могут иметь одну и ту же минимальную энергию. В результате возникает набор пар, обладающих общей энергией несколько меньшей, чем у свободных электронов металла. Именно эта разница в энергии создает быстрое изменение свойств металла при достижении критической температуры.



Когда тепловая энергия решетки оказывается меньше, чем это падение энергии, мы наблюдаем устойчивый поток электронных пар в сочетании с вибрациями решетки, характерными для состояния сверхпроводимости. Поскольку волновые движения решетки распространяются по ней на большие расстояния, сопротивление отсутствует — все электронные пары движутся одна относительно другой. Избегая каких бы то ни было столкновений с неподвижными атомами решетки, электронные пары ведут себя, как беспрепятственно текущая сверхжидкость. При нагревании куперовские пары распадаются и утрачивают бозонные свойства. Электроны снова получают возможность сталкиваться с ионами решетки, согревшимися и вибрирующими, что и создает электрическое сопротивление. Происходит быстрый переход между состояниями — скоординированное движение бозонов сменяется беспорядочным движением фермионов, и наоборот.

**Теплые сверхпроводники** В 1980-х были заложены основы технологии сверхпроводников. В 1986-м швейцарские исследователи обнаружили новый класс керамических материалов, которые становились сверхпроводниками при относительно высоких температурах, — их и назвали «высокотемпературными сверхпроводниками». Первое такое соединение, образованное из лантана, бария, меди и кислорода (оно получило название «оксида меди», или «купрата»), становилось сверхпроводником при температуре в 30 К. Год спустя был получен материал, становящийся сверхпроводником при температуре порядка 90 К (более высокой, чем у широко используемого в качестве хладагента жидкого азота). Использование керамических материалов, в состав которых входят перовскит и (насыщенные таллием) ртутные купраты, позволило повысить критическую температуру сверхпроводимости до 140 К, а при высоком давлении эта температура еще и повышается.

Вообще говоря, керамике полагается быть изолятором, так что результат этот оказался неожиданным. Физики все еще пытаются создать новую теорию, объясняющую высокотемпературную сверхпроводимость. Тем не менее разработка таких материалов уже стала быстро развивающейся областью физики, способной привести к революционным изменениям в электронике.

Как используются сверхпроводники? Они помогают создавать мощные электромагниты, необходимые для ускорителей частиц и для работы МРТ-сканнеров в больницах. Когда-нибудь с их помощью можно будет создавать эффективные трансформаторы и даже поезда на магнитной подвеске. Впрочем, пока они работают лишь при очень низких температурах, потому использование их ограничено. Отсюда и поиски высокотемпературных сверхпроводников, которые могли бы привести к грандиозным переменам.

## В сухом остатке Сопротивление бессмысленно



# 32 Атом Резерфорда

Атомы не являются самыми малыми строительными блоками вещества, как считалось когда-то. В начале XX века такие физики, как Эрнест Резерфорд, взломали их, обнаружив сначала слои электронов, а затем твердую сердцевину, или ядро, состоящее из протонов и нейтронов. Для того чтобы объяснить, как эти частицы удерживаются в ядре, физики придумали новое фундаментальное взаимодействие — сильное ядерное. Начался век атома.

Идея о том, что вещество состоит из огромного множества крошечных атомов, существовала еще со времен древних греков. Но если греки считали атом малейшей неделимой составляющей вещества, то физики XX века поняли, что это не так, и приступили к исследованию его внутреннего устройства.

**Пудинг** Первый уровень, которым надлежало заняться, был электронным. Электроны удалось выделить из атомов в 1887 году, и сделал это Джозеф Джон Томсон, пропустив электрический ток через газ, заполнявший стеклянную трубку. Томсон же предложил для атома «пудинговую модель», в которой отрицательно заряженные электроны рассыпаны, точно чернослив или изюм, по имеющему положительный заряд тесту. Сегодня это назвали бы моделью черничного кекса. По существу, атом Томсона — это положительно заряженное облако, содержащее электроны, которые можно с относительной легкостью из него высвободить. И электроны, и положительные заряды могут смешиваться на всем протяжении «пудинга».

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1887**

Томсон открывает электрон

**1904**

Томсон предлагает «пудинговую модель»

**1898**

Резерфорд ставит опыт с золотой фольгой

### Эрнест Резерфорд, 1871–1937

Новозеландец Резерфорд был алхимиком наших дней, сумевшим с помощью радиоактивного облучения превратить один элемент в другой, азот — в кислород. Неизменно вдохновлявший своих сотрудников руководитель Кавендишской лаборатории Кембриджа, он воспитал немало число нобелевских

лауреатов. Его прозвали «крокодиллом» — и это животное так и осталось до наших дней символом возглавлявшейся им некогда лаборатории. В 1910 году исследования рассеяния альфа-лучей и внутренней структуры атома привели Резерфорда к открытию атомных ядер.

**Ядра** Недолгое время спустя, в 1909-м, Эрнеста Резерфорда озадачил результат эксперимента, в котором он обстреливал тяжелыми альфа-частицами очень тонкую золотую фольгу — достаточно тонкую для того, чтобы пропускать эти частицы. К изумлению Резерфорда, малая их часть рикошетом отлетала от фольги, возвращаясь к нему. Направление движения альфа-частиц изменялось на 180 градусов, как если бы они налетали на кирпичную стену. Резерфорд понял, что атомы золота, из которых состояла фольга, содержат нечто твердое и достаточно массивное, способное отражать тяжелые альфа-частицы.

Резерфорд пришел к выводу, что пудинг Томсона объяснить обнаруженное им явление не способен. Если атом — это всего лишь тесто, состоящее из смеси положительно и отрицательно заряженных частиц, то ни те ни другие не могут быть тяжелыми настолько, чтобы отразить превышающую их размерами альфа-частицу. А значит, заключил Резерфорд, атомы золота должны обладать плотной сердцевиной, или «ядром» («*nucleus*» — от латинского названия ядрышка ореха). Так началась ядерная физика, физика атомных ядер.

**«Это было почти так же невероятно, как возможность того, что выпущенный вами 15-дюймовый снаряд отлетит от листка папиросной бумаги и попадет в вас»**

**Эрнест Резерфорд, 1936**

**1911**

Резерфорд предлагает ядерную модель

**1918**

Резерфорд изолирует протон

**1932**

Чедвик открывает нейтрон

**1934**

Юкава вводит понятие сильного ядерного взаимодействия

## Три близнеца

Радиоактивные вещества испускают радиацию трех видов: альфа-, бета- и гамма-лучи. Альфа-радиация образуется тяжелыми ядрами гелия, содержащими два протона и два нейтрона. По причине их тяжести альфа-частицы не могут пролетать большие расстояния, поскольку теряют энергию в столкновениях, а остановить их легко и просто, для этого довольно листка бумаги. Второй тип радиации переносится бета-частицами — это высокоскоростные электроны, очень легкие и имеющие отрицательный заряд. Бета-частицы способны проходить расстояния большие, чем альфа-лучи, однако и их легко останавливают металлы, скажем алюминиевая пластинка. Третий вид радиации — гамма-лучи, это электромагнитные волны, ассоциируемые с фотонами, которые лишены массы, но переносят большую энергию. Вот они проникают повсюду, а защитить от них могут лишь плотные блоки из свинца или бетона. Все три типа испускаются нестабильными атомами, которые мы называем радиоактивными.



**Изотопы** Физики знали, как определять массы элементов периодической таблицы, и, стало быть, знали относительные веса атомов. Куда труднее было понять, каким образом происходит упорядочивание зарядов. Поскольку Резерфорду были известны лишь электроны и положительно заряженные ядра, он попытался уравновесить заряды исходя из предположения, что ядра состоят из смеси протонов (положительно заряженных частиц, открытых им в 1918 году посредством изоляции ядра водорода)

и некоторого числа электронов, частично нейтрализующих полный заряд протонов. Остальные электроны вращаются вокруг ядер по определяемым квантовой теорией орбиталям. Ядро самого легкого элемента, водорода, содержит всего один протон, вокруг которого вращается один электрон.

Для некоторых элементов известны различные их формы со странными весами, называемые «изотопами». Вес углерода составляет обычно 12 атомных единиц, однако временами встречается и углерод с весом в 14 атомных единиц. Углерод-14 нестабилен, период его полураспада (время, за которое распадается половина всех атомов, испускающих радиоактивные частицы) составляет 5730 лет. Распадаясь, он испускает бета-частицы и обращается в азот-14. Эта реакция используется для датировки радиоуглеродным методом, позволяющей определить возраст тысячелетних археологических артефактов — дерева или оставшихся от пожара углей.

**Нейтроны** В начале 1930-х обнаружили новый тип «радиации», достаточно тяжелый, чтобы выбивать протоны из парафина, но не обладающий электрическим зарядом. Кембриджский физик Джеймс Чедвик показал, что это излучение образуют частицы, имеющие ту же массу, что и протон. Частицу назвали «нейтроном», и она изменила модель атома. Ученые поняли, что ядро углерода-12, к примеру, состоит из 6 протонов и 6 нейтронов (что и дает массу в 12 атомных единиц), вокруг него вращаются 6 электронов. Нейтроны и протоны имеют общее название — «нуклоны».

**«Существуют лишь атомы и пустота; все остальное — мнения»**

**Демокрит, 460–370 до н. э.**

**Сильное взаимодействие** Ядро чрезвычайно мало в сравнении с полным размером атома, включающим и электронную оболочку, — оно меньше атома в сотни тысяч раз. Ядро имеет в поперечнике лишь несколько фемтометров ( $10^{-15}$  метров). Если увеличить атом до размеров Земли, его центральное ядро окажется в диаметре 10 км — это длина Манхэттена. В крошечном ядре сосредоточена практически вся масса атома, оно может содержать десятки протонов. Что же удерживает плотно упакованные положительно заряженные частицы в столь малом объеме? Для того чтобы преодолеть электростатическое отталкивание положительных зарядов и сохранить целостность ядра, физикам пришлось придумать новый тип сил — сильное ядерное взаимодействие.

Если два протона сближаются, они сначала отталкиваются друг от друга, поскольку заряды у них одинаковые (сила отталкивания следует максвелловскому закону обратного квадрата). Но если заставить протоны сойтись поближе, то возникнет сильное ядерное взаимодействие, которое будет удерживать их вместе. Сильное взаимодействие возникает лишь на очень малых расстояниях, однако оно намного больше силы электростатического отталкивания. Если попытаться сблизить протоны еще сильнее, они будут сопротивляться и поведут себя как твердые шарики, — у их сближения существует строгий предел. Такое поведение означает, что ядро плотно упаковано, очень компактно и твердо как камень.

В 1934 году Хидэки Юкава предположил, что ядерная сила переносится особыми частицами (мезонами), ведущими себя подобно фотонам. Протоны и нейтроны «склеиваются», обмениваясь мезонами. Даже сейчас непонятна причина, по которой сильное взаимодействие проявляется на столь определенном расстоянии, — почему оно так слабо вне ядра и так сильно на близком расстоянии. Оно словно бы прикрепляет нуклоны друг к другу, выдерживая точное расстояние между ними. Сильное взаимодействие — одно из четырех фундаментальных взаимодействий, наряду с гравитационным, электромагнитным и еще одним ядерным взаимодействием, слабым.

**В сухом остатке**  
**Жесткая сердцевина**

# 33 Антиматерия

В научной фантастике нередко встречаются космические корабли с двигателями, «работающими на антиматерии», однако антиматерия — вовсе не фантастика и даже была искусственным образом получена на Земле. Будучи зеркальным отображением обычной материи, имеющим отрицательную энергию, антиматерия не может подолгу сосуществовать с материей — при их контакте обе аннигилируют, что сопровождается выбросом энергии. Но само существование антиматерии намекает на присутствие глубинных симметрий в физике элементарных частиц.

Представьте, что вы встречаете по улице точное ваше подобие. Вашего близнеца, состоящего из антиматерии. Что вы сделаете — пожмите ему руку? Антиматерия была предсказана в 1920-х — при попытке объединить квантовую теорию с теорией относительности — и обнаружена в 1930-х. Это зеркальное отражение материи, у антиматерии заряды частиц, энергии и другие квантовые свойства имеют противоположные знаки. Антиэлектрон, именуемый «позитроном», обладает той же, что и электрон, массой, но заряжен положительно. Так же протоны и иные частицы имеют противоположных антиматериальных родственников.

**На каждый миллиард частиц антиматерии приходится миллиард и еще одна частица материи. И когда завершается взаимная аннигиляция, остается одна миллиардная часть того, что было, — это и есть наша нынешняя вселенная**

Альберт Эйнштейн, 1879–1955

Отрицательная энергия Выводя в 1928-м уравнение движения электрона, британский физик Пол Дирак обнаружил, что оно предлагает для электронов возможность обладания как положительной, так и отрицательной энергией. Точно так же уравнение  $x^2 = 4$  имеет два

Выводя в 1928-м уравнение движения электрона, британский физик Пол Дирак обнаружил, что оно предлагает для электронов возможность обладания как положительной, так и отрицательной энергией. Точно так же уравнение  $x^2 = 4$  имеет два

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1928**

Дирак теоретически предсказывает существование антиматерии

**1932**

Андерсон открывает позитрон

решения:  $x = 2$  и  $x = -2$ . У Дирака было два способа решения этой проблемы: положительная энергия, ассоциирующаяся с обычным электроном, и отрицательная, представлявшаяся бессмысленной. Он не стал отмахиваться от термина «отрицательная энергия», предположив, что такие частицы могут существовать. Это и есть «антиматерия».

**Античастицы** Вскоре началась охота на антиматерию.

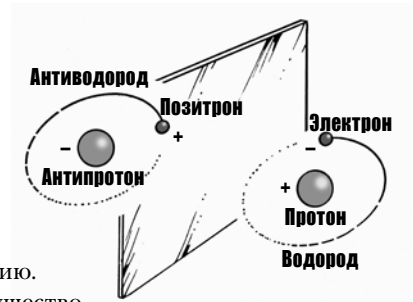
В 1932-м Карл Андерсон экспериментально подтвердил существование позитрона. Он просмотрел следы частиц, во множестве порождаемых космическими лучами (частицами с высокими энергиями, которые врезаются в атмосферу, прилетая из космоса), и обнаружил след положительно заряженной частицы с массой электрона — след позитрона. Так антиматерия превратилась из абстрактной идеи в реальность.

Через два десятилетия был открыт антипротон. Физики строили новые ускорители элементарных частиц, в которых магнитное поле использовалось для разгона частиц до высоких скоростей. Мощные потоки высокоскоростных протонов обладали достаточной энергией для выявления антипротона, что и произошло в 1955 году. А вскоре открыли и антинейтрон.

Позволяет ли наличие антиматериальных строительных блоков построить антиатом или, по крайней мере, антиядро? Ответ был получен в 1965-м. Антиядро тяжелого водорода (дейтерия), то есть ядро антидейтерия, было получено учеными ЦЕРНа в Европе и Брукхейвенской лаборатории в Америке. Чтобы привязать позитрон к антипротону и получить атом антиводорода, времени ушло больше, но в 1995-м и это удалось. В настоящее время экспериментаторы выясняют, ведет ли себя антиводород так же, как обычный водород.

На Земле физики создают антиматерию в ускорителях элементарных частиц, таких как построенные в ЦЕРНе, Швейцария, и в Фермилабе под Чикаго. Когда встречаются потоки частиц и античастиц, они аннигилируют друг друга, что сопровождается выбросом чистой энергии. Масса превращается в энергию в соответствии с уравнением Эйнштейна  $E = mc^2$ . Так что если встретите на улице вашего антиматериального двойника, обниматься с ним, пожалуй, не стоит.

**Универсальные асимметрии** Если бы во вселенной было много антиматерии, вспышки аннигиляции происходили бы постоянно. Постепенно материя и антиматерия окончательно уничтожили бы друг друга в маленьких взрывах. Поскольку мы



1955

Обнаружены антипротоны

1965

Создано первое антиядро

1995

Созданы атомы антиводорода



### Пол Дирак, 1902–1984

Британский физик Пол Дирак был талантлив, но очень застенчив. О нем говорили, что его словарный запас исчерпывается словами «да», «нет» и «не знаю». Он как-то сказал: «Меня еще в школе научили не начинать произносить предложение, не зная, чем я его закончу». Немногословность испукалась математическими способностями. Его докторские тезисы, краткие и четкие, давали новое математическое описание квантовой механики. Ему удалось отчасти соединить теории квантовой механики

и теорию относительности, однако его помнят и благодаря выдающейся работе о магнитном монополе и предсказанию антиматерии. Удостоенный в 1933-м Нобелевской премии, Дирак поначалу хотел отказаться от нее, не желая привлекать к себе внимание. Но сдался, когда ему объяснили, что отказ его наделает гораздо больше шума. Отца своего Дирак на церемонию вручения премии не пригласил, — возможно, потому, что их отношения испортились после самоубийства брата Дирака.

этого не наблюдаем, большого количества антиматерии во вселенной быть не может. Собственно, мы наблюдаем лишь повсеместное распространение обычных частиц. Отсюда следует, что при возникновении вселенной должен был существовать дисбаланс — нормальной материи образовалось больше, чем антиматерии.

**В науке человек старается сказать людям — и так, чтобы его понял каждый, — то, чего никто прежде не знал. В поэзии — наоборот ?**

Пол Дирак, 1902–1984

Как и все зеркальные отражения, частицы и античастицы связаны различными симметриями. Одна из них — время. Поскольку античастицы обладают отрицательной энергией, они математически эквивалентны нормальным частицам, движущимся во времени вспять. Стало быть, позитрон можно мыслить как электрон, путешествующий из будущего в прошлое. Следующая симметрия включает заряды и другие квантовые свойства, все они имеют обратные знаки, — это известно как «зарядовое сопряжение». Третья симметрия связана с перемещением в пространстве. Если вспомнить о принципе Маха, замена направлений образующих пространственную решетку координат противоположными на движении никак не сказывается. Частица, движущаяся слева направо, выглядит так же, как движущаяся справа налево, не меняется она, и если вращается по часовой стрелке или против нее. Эта «симметрия четности» характерна для большинства частиц, однако есть и такие, для которых она сохраняется не всегда. Нейтрино

существуют лишь в одной форме — левой; «правых» нейтрино не бывает. Обратное справедливо для антинейтрино — они все «правые». Таким образом, симметрия четности может иногда нарушаться, хотя комбинация зарядовой сопряженности и четности сохраняется. Это свойство называется «зарядово-четностной» или, для краткости, СР-инвариантностью».

Химики обнаружили, что некоторые молекулы предпочитают существовать лишь как левосторонняя или правосторонняя структура. Причина этого, а также причина, по которой вселенная содержит главным образом материю, а не антиматерию, остается загадкой. Лишь менее 0,01% вещества вселенной состоит из антиматерии. Однако вселенная содержит также различные формы энергии, включая и великое множество фотонов. И потому возможно, что во время Большого взрыва были созданы огромные количества материи и антиматерии, но очень быстро большая часть и той и другой аннигилировала. Сейчас сохранилась лишь верхушка айсберга. Крошечного дисбаланса в пользу первой было бы довольно, чтобы объяснить ее нынешнее преобладание. Только одной из каждых 10 000 000 000 ( $10^{10}$ ) частиц требовалось пережить долю секунды, прошедшую после Большого взрыва, все остальные уничтожила аннигиляция. Остаток материи мог уцелеть благодаря легкой асимметрии, нарушению СР-инвариантности.

За эту асимметрию могли бы отвечать тяжелые бозоны, называемые «Х-бозонами», которые еще предстоит обнаружить. Эти массивные частицы распадаются слегка несбалансированным образом, что приводит к незначительному перепроизводству материи. Х-бозоны могут также взаимодействовать с протонами, заставляя их распадаться, а это означает, что со временем вся материя обратится в кисель из частиц более мелких. Впрочем, имеется и новость приятная: произойдет это *очень* не скоро. Мы еще целы, и никто пока не наблюдал распада протона, а это означает, что протоны весьма стабильны и должны существовать по меньшей мере миллиарды миллиардов миллиардов лет — гораздо дольше, чем сама вселенная.

**«Противоположностью верного утверждения является утверждение ложное. Однако противоположность глубокой истины вполне может оказаться еще одной глубокой истиной»**

**Нильс Бор, 1885–1962**

**В сухом остатке  
Зеркальное  
отображение материи**

# 34 Деление ядер

Демонстрация деления атомного ядра — это и один из высших взлетов науки, и одно из глубочайших ее падений. Это открытие стало огромным шагом в нашем понимании ядерной физики и ознаменовало зарю атомной энергетики. Однако разразившаяся вскоре война привела к тому, что эта новая технология была очень быстро реализована в атомном оружии, уничтожившем японские города Хиросиму и Нагасаки и создавшем проблему его распространения, решение которой и сейчас представляется затруднительным.

В начале XX века перед нами начал раскрываться внутренний мир атома. Подобно русской матрешке, он оказался состоящим из множества внешних электронных оболочек, объемлющих жесткую сердцевину, или ядро. В начале 1930-х удалось взломать и ядро, показав, что оно состоит из смеси положительно заряженных протонов с нейтронами. И те и другие намного тяжелее эфемерных электронов, а удерживает их рядом друг с другом сильное ядерное взаимодействие. Разорвать их энергетическую спайку — вот что стало для ученых заветной целью.

**Взлом** Первая успешная попытка расщепления ядра была предпринята в 1932 году. В Кембридже, Англия, Кокрофт и Уолтон бомбардировали металлы очень быстрыми протонами. Химический состав металлов менялся, при этом, согласно формуле Эйнштейна  $E = mc^2$ , выделялась энергия. Однако эти эксперименты требовали больших затрат энергии, чем та, что получалась на выходе, поэтому физики не поверили в возможность ее получения в коммерческих масштабах.

В 1938 году немецкие ученые Отто Ган и Фриц Штрассман обстреляли нейтронами тяжелый элемент уран, рассчитывая создать новый

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ****1932**Джеймс Чедвик  
открывает нейтрон**1938**

Наблюдается деление ядра

элемент, еще более тяжелый. Однако вместо него они получили элементы куда более легкие, некоторые были в два раза легче урана.

Создавалось впечатление, что при бомбардировке ядра чем-то, обладающим менее чем половиной процента его массы, оно раскалывается, а это примерно то же, что разбить надвое арбуз, запустив в него вишневой косточкой. Ган описал этот результат в письме к коллеге-австрийке Лизе Мейтнер, только что бежавшей из фашистской Германии в Швецию. Мейтнер, которую новость озадачила не меньше, чем Гана, обсудила ее со своим приехавшим к ней из Дании племянником, также физиком, Отто Фришем. Мейтнер и Фриш пришли к выводу, что при расщеплении ядра должна высвободиться энергия, поскольку общая энергия двух его половинок оказалась меньшей, чем у исходного атома урана. Вернувшись в Данию, взволнованный Фриш не удержался и рассказал об этой идее Нильсу Бору. Бор, вскоре отплывший в Америку, уже на корабле начал размышлять над объяснением случившегося, а оказавшись в Колумбийском университете, рассказал о новости работавшему там итальянцу Энрико Ферми.

Мейтнер и Фриш опубликовали свою статью раньше Бора, введя в ней понятие «деления» — по аналогии с биологической клеткой. А в Нью-Йорке Ферми и венгерский

**«...Постепенно мы пришли к мысли, что, быть может, речь должна идти не о ядре, словно бы разрубаемом зубилом, но скорее о справедливости идеи Бора, согласно которой ядро похоже на каплю жидкости»**

**Отто Ган, 1967**

## Ядерная энергия

Субкритические цепные реакции можно поддерживать в стабильном состоянии и использовать на атомных электростанциях. При этом поток нейтронов регулируется стержнями из бора, поглощающими избыточные нейтроны. Кроме того, необходим охладитель, поскольку при реакции деления производится большое количество тепла. Как правило, эту роль

исполняет обычная вода, но возможно также использование воды под давлением, газообразного гелия или жидкого натрия. В настоящее время ведущую роль в использовании ядерной энергии играет Франция: атомные электростанции вырабатывают 70% производимой там энергии — в сравнении с 20% в Великобритании и США.

**1942**

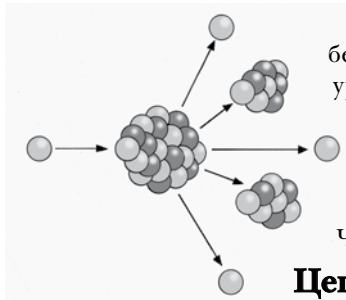
Получена первая цепная реакция

**1945**

На Японию сбрасываются атомные бомбы

**1951**

Атомная энергия используется для получения электричества



беженец Лео Сцилард пришли к заключению, что эта реакция урана может порождать новые свободные нейтроны, которые увеличат количество делящихся ядер, и в итоге возникнет ядерная цепная (сама себя поддерживающая) реакция. И в 1942-м Ферми получил первую цепную реакцию в находившейся под футбольным стадионом лаборатории Чикагского университета.

**Цепная реакция** Коллега Ферми, физик Артур Комптон, вспоминал впоследствии: «Ученые, их было около дюжины, стояли

на балконе, глядя в приборы и покручивая ручки регуляторов. Под ними возвышался на полу комнаты большой гранитный куб, содержащий урановые блоки, в которых, как мы надеялись, разовьется цепная реакция. В высверленные в кубе отверстия были вставлены регулирующие стержни. После нескольких предварительных испытаний Ферми велел выдвинуть регулирующий стержень на один фут. Мы понимали, что теперь начнется настоящий эксперимент. Счетчики Гейгера, которые регистрировали вылетающие из реактора нейтроны, защелкали быстрее, быстрее, и наконец щелканье обратилось в непрерывный треск. Реакция набирала силу, радиация грозила стать опасной для находившихся на балконе людей. «Опускайте стержни», — распорядился Ферми. Треск счетчиков спал до медленной череды щелчков. Так впервые была высвобождена атомная энергия. Реакция была управляемой, ее удалось остановить. Кто-то протянул Ферми бутылку итальянского вина. Раздалось негромкое «ура».

**Манхэттенский проект** Сцилард, боявшийся того, что немецкие ученые воспроизведут успех Ферми, обратился к Альберту Эйнштейну, и в 1939-м они направили президенту Рузвельту совместное письмо с предупреждением о такой возможности. Однако до 1941 года, когда британские физики опубликовали расчеты, показывающие, насколько просто создать атомное оружие, ничего не происходило. Публикация почти

## Радиоактивные отходы

Ядерные реакторы суть эффективные производители энергии, однако они производят и радиоактивные отходы. Эти чрезвычайно токсичные вещества содержат остатки уранового топлива, которые могут сохранять радиоактивные свойства в течение тысяч лет, и элементы более тяжелые (такие как плутоний), остающиеся опасными сотни тысяч лет. Опасные отходы производятся лишь в небольших количествах, однако к ним следует добавить отходы более низкого уровня — руду, из которой извлечен уран. Проблему избавления от них в масштабах всего мира еще предстоит решить.



совпала с нападением японцев на Пирл-Харбор, и вскоре Рузвельт распорядился начать в США создание атомной бомбы, — эта работа получила название «Манхэттенский проект». Во главе его стоял физик из Беркли Роберт Оппенгеймер, работы велись на секретной базе в Лос-Аламосе, штат Нью-Мексико.

**«Я думал, что этот день останется одним из самых черных в истории человечества... Но понимал также: необходимо предпринять что-то на случай, если у немцев бомба появится раньше, чем у нас... Необходимыми для этого людьми они располагали... У нас не было выбора, во всяком случае, так мы считали»**

**Лео Сцилард, 1898–1964**

Летом 1942 года группа Оппенгеймера спроектировала механизмы бомбы. Чтобы запустить цепную реакцию, которая приведет к взрыву, требовалась критическая масса урана, однако до взрыва части ее следовало хранить раздельно. Предпочтение было отдано двум способам — «пушечному», при котором обычная взрывчатка «выстреливает» одним комом урана в другой, создавая критическую массу, и «имплозионному»: та же взрывчатка схлопывает урановую сферу так, что она падает на свое плутониевое ядро.

Уран добывается в двух видах, или изотопах, отличающихся различными числами нейтронов в ядрах. Наиболее распространенный изотоп, уран-238, встречается в десять раз чаще, чем другой, уран-235. Последний более эффективен для создания атомной бомбы, поэтому сырой уран обогащают, производя уран-235. Получив дополнительный нейтрон, уран-238 обращается в плутоний-239. Последний нестабилен, а при его распаде возникает еще больше нейтронов на грамм, так что добавление плутония к урану позволяет с большей надежностью запустить цепную реакцию. Для создания бомбы первого типа, названной «Малыш», был использован «пушечный» механизм и обогащенный уран. Кроме того, была создана бомба «Голстяк», в которой использовался плутоний и урановая сфера.

6 августа 1945 года «Малыш» упал на Хиросиму, а три дня спустя «Голстяк» разрушил Нагасаки. Каждая бомба была эквивалентна почти 20 000 тоннам динамита, и каждая мгновенно убила 70 000–100 000 человек, а со временем от последствий взрыва людей погибло вдвое больше.

## В сухом остатке Расщепление атома



# 35 Слияние ядер

Все элементы вокруг и внутри нас — это продукты слияния ядер, или ядерного синтеза. Такое слияние питает звезды — и Солнце в том числе, — где и создаются все элементы более тяжелые, чем водород. Мы и вправду созданы из звездной пыли. Если нам удастся заставить мощь звезд работать здесь, на Земле, ядерный синтез может стать ключом к получению — и в неограниченных количествах — чистой энергии.

Слияние ядер — это процесс, в котором легкие атомные ядра соединяются, образуя более тяжелые. Ядра водорода, если на них как следует поднажать, сливаются и возникает гелий — при этом высвобождается энергия, очень большая энергия. Мало-помалу последовательность

таких реакций ядерного синтеза создает ядра все более тяжелые. Именно так, начиная почти с нуля, и были созданы все известные нам элементы.

**«Я прошу вас не упустить из вида оба пути. Ибо путь к пониманию звезд проходит через атом; а важные сведения об атоме были получены с помощью звезд»**

**Сэр Артур Эддингтон, 1928**

**Под сильным нажимом** Добиться слияния даже самых легких ядер, ядер водорода, дело до крайности трудное. Для него требуются огромные температуры и давления, поэтому в природе слияние происходит в условиях поистине экстремальных, внутри Солнца и других звезд. Чтобы добиться слияния ядер, необходимо преодолеть силу, которая поддерживает их целостность. Ядра состоят из протонов и нейтронов, удерживаемых вместе сильным ядерным взаимодействием. Сила этого взаимодействия работает главным образом внутри крошечных ядер и значительно ослабевает вне их. Так как протоны несут положительный заряд, они взаимно отталкиваются, и оторвать их друг от друга немного легче. Однако сильное взаимодействие преодолевает это отталкивание, сохраняя ядра в целостности.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

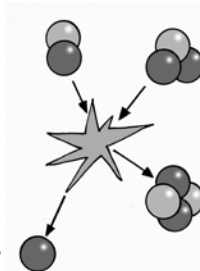
**1920**

Эддингтон применяет идею слияния к звездам

**1932**

Слияние ядер водорода демонстрируется в лабораторных условиях

Поскольку сильное взаимодействие работает на малых и точно определенных расстояниях, его общая сила в маленьких ядрах значительней, чем в больших. В ядрах с большим весом, таких как у урана с его 238 нуклонами, взаимное притяжение нуклонов, которые находятся на разных краях ядра, оказывается более слабым. С другой стороны, сила электрического отталкивания ощущается и на таких расстояниях, поэтому в больших ядрах она становится фактором более весомым. К тому же отталкивание подпитывается большим числом положительных зарядов. Чистый эффект такого баланса состоит в том, что энергия (на один нуклон), необходимая для сохранения целостности ядер, увеличивается вместе с атомным весом вплоть до элементов никеля и железа, которые очень стабильны, а затем, для ядер побольше, начинает спадать. Поэтому и деление больших ядер оказывается относительно легким — их можно развалить несильным ударом.



Энергетический барьер, который необходимо преодолеть при слиянии, является наименьшим в случае изотопов водорода, содержащих всего один протон. Имеется три типа водорода: «нормальные» атомы, состоящие из одного протона и связанного с ним электрона; дейтерий, или тяжелый водород, содержащий один протон, один электрон и один нейтрон, и тритий — у него два нейтрона, отчего он еще тяжелее. Таким образом, простейшая реакция синтеза требует слияния водорода и дейтерия плюс добавления свободного нейтрона — получится тритий. Она хоть и простейшая, но для ее запуска требуется температура в 800 градусов Кельвина (отчего тритий и встречается довольно редко).

**Термоядерные реакторы** На Земле физики пытаются воспроизвести эти экстремальные условия в термоядерных реакторах, что позволило бы получать энергию. Однако до того, как у них появятся практические результаты, пройдет не один десяток лет. Даже самые передовые термоядерные реакторы потребляют больше энергии, чем производят, — и на много порядков больше.

Термоядерная энергия — заветная цель энергетики. В сравнении с технологией деления ядер реакции слияния относительно чисты и эффективны, вот только заставить их работать пока не удается. Атомов для производства огромных количеств энергии требуется очень немного (согласно уравнению Эйнштейна,  $E = mc^2$ ), отходов получается очень мало, и они определено не содержат ничего столь неприятного, как сверхтяжелые элементы, которые мы получаем от атомных электростанций. Да и к парниковому эффекту энергия слияния не приводит, это самодостаточный, надежный источник энергии, нужно только наладить производство его «горючего» — водорода и дейтерия. Хотя, конечно, и он несовершенен и чреват побочными радиоактивными продуктами вроде нейтронов.

**1939**

Ганс Бете описывает звездные процессы слияния ядер

**1946–1954**

Фред Хойл объясняет, как возникают тяжелые элементы

**1957**

Бербидж, Бербидж, Фаулер и Хойл публикуют знаменитую статью о ядерном синтезе

## Холодный синтез

В 1989 году ученый мир взбудоражила новость. Мартин Флейшман и Стэнли Понс сообщили, что им удалось осуществить ядерный синтез не в огромном реакторе, но «в пробирке». Пропуская электрический ток сквозь мензурку с тяжелой водой (в которой атомы водорода заменены атомами дейтерия), они, по их словам, создали энергию посредством «холодного» ядерного синтеза. Они уверяли, что их эксперимент дал больше энергии, чем потребил, и объясняли это слиянием ядер. Шум поднялся страшный. Большинство ученых сочло, что Флейшман и Понс

ошиблись в расчете энергетического бюджета, что, впрочем, не доказано и поныне. Время от времени стали появляться другие спорные сообщения о лабораторном ядерном синтезе. В 2002-м Рузи Талейархан предположил, что за так называемой соно-люминисценцией — излучением света имеющимся в жидкости пузырьками при ее облучении (и нагревании) ультразвуковыми волнами — стоит ядерный синтез. Присяжные все еще не решили, существует ли и вправду возможность осуществления ядерного синтеза в обычной лабораторной колбе.

Необходимость высоких температур приводит к тому, что главной трудностью оказывается контролирование раскаленного газа, и потому достичь термоядерного синтеза в колоссальных реакторах удастся лишь на несколько секунд. В попытках преодолеть этот технологический барьер международная команда строит во Франции самый большой термоядерный реактор, названный «Международным термоядерным экспериментальным реактором (ITER)», который позволит проверить возможность коммерческого использования термоядерного синтеза.

**Звездная пыль** Звезды — это природные термоядерные реакторы. Согласно расчетам немецкого физика Ганса Бете, светятся они из-за того, что ядра водорода (протоны) в них превращаются в ядра гелия (два протона и два нейтрона). В этом преобразовании, с превращением двух протонов в два нейтрона, рождаются фотоны и нейтрино.

Внутри звезд постепенно, шаг за шагом, образуются более тяжелые элементы — так, точно кухня термоядерного синтеза строго следует установленным рецептам. При последовательном «сгорании» сначала водорода, затем гелия, затем других элементов, которые легче железа, а со временем и элементов, которые тяжелее его, возникают ядра все более и более крупные. Звезды, подобные Солнцу, светятся потому, что они синтезируют из водорода гелий, а это процесс довольно медленный, тяжелые же

элементы образуются при нем лишь в малых количествах. В звездах покрупнее этот процесс убыстряется участием в дальнейших реакциях углерода, азота и кислорода. Так что тяжелых элементов в них производится больше и происходит это быстрее. После появления гелия из него можно соорудить углерод (три атома гелия-4 сливаются, образуя на промежуточном этапе нестабильный бериллий-8). Углерод может комбинироваться с гелием, что дает кислород, неон и магний. Эти медленные преобразования занимают большую часть жизни звезды. Элементы более тяжелые, чем железо, производятся в несколько отличных реакциях, постепенно выстраивая всю последовательность ядер, отвечающую периодической таблице элементов.

**Первые звезды** Некоторые из первых легких элементов возникли не в звездах, но в образовавшемся после Большого взрыва огненном шаре. Поначалу вселенная была столь горячей, что даже атомы в ней стабильными не были. По мере ее остывания произошла конденсация атомов водорода, вместе с крохами гелия и лития и совсем уж малыми количествами бериллия. Таковы были первые ингредиенты всех звезд, да и всего остального тоже. Все более тяжелые элементы создавались в звездах и вокруг них, а затем выбрасывались в пространство взрывающимися звездами, которые мы именуем «суперновыми». Однако мы и сейчас не понимаем, как заработали первые звезды. Самая первая звезда тяжелых элементов не содержала, у нее имелся только водород, и, стало быть, она не могла остывать достаточно быстро для того, чтобы начать сжиматься и включить механизм термоядерного синтеза. Процесс гравитационного сжатия слишком сильно разогревает водород. Тяжелые элементы помогают ему остывать, излучая свет, поэтому, когда появилось первое поколение звезд, начавших посредством взрывов суперновых выбрасывать в пространство свои побочные продукты, образование других звезд стало делом более легким. Но достаточно быстрое возникновение первой звезды и ее ближайших родственниц все еще остается загадкой.

Термоядерный синтез — это фундаментальный источник энергии вселенной. Если мы сможем заставить его работать на нас, все наши энергетические тревоги останутся позади. Однако это требует обуздания огромной мощи звезд здесь, на Земле, что далеко не просто.

**«Все мы — случайно охладившиеся кусочки звездной материи, кусочки звезд, у которых что-то не заладилось»**

**Сэр Артур Эддингтон, 1882–1944**

**В сухом остатке  
Звездная мощь**

# 36 Стандартная модель

Протоны, нейтроны и электроны — это лишь верхушка айсберга элементарных частиц. Протоны и нейтроны состоят из еще меньших, чем они, кварков, электроны водят компанию с нейтрино, а силы взаимодействия переносятся всем сообществом бозонов, к которому принадлежат и фотоны. «Стандартная модель» сводит весь зоопарк элементарных частиц в одно семейство, обладающее генеалогическим древом.

Древние греки считали атомы мельчайшими составляющими вещества. И лишь в конце XIX столетия из атомов удалось вытянуть составляющие еще более мелкие — сначала электроны,

а затем протоны и нейтроны. Так что же, три эти частицы и есть настоящие строительные блоки материи?

**Даже если существует всего лишь одна возможная единая теория, она представляет собой просто набор правил и уравнений. Но что именно вдыхает в уравнения жизнь и создает вселенную, которую они должны описать?**

**Стивен Хокинг, 1988**

А вот и нет. Свои «кирпичики» имеются и у протонов с нейтронами. Но и это не все. Точно так же, как фотоны являются носителями электромагнитного взаимодействия, существуют мириады частиц, переносящих другие фундаментальные взаимодействия. Электроны, насколько нам известно, неделимы, но им составляют компанию нейтрино. Кроме того, у всех частиц имеются призрачные двойники в мире антиматерии. Все это выглядит достаточно сложным, да таковым и является, однако многое множество элементарных частиц можно описать в рамках единой системы, именуемой «стандартной моделью» физики элементарных частиц.

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**400 до н.э.**

Демокрит выдвигает идею атомов

**Копаем глубже** В начале XX века физики знали, что вещество состоит из протонов, нейтронов и электронов. Нильс Бор описал, каким образом электроны, следуя квантовой теории, располагаются в чередующихся оболочках ядра атома, подобно планетам, которые вращаются вокруг Солнца. Свойства ядра оказались еще более странными. Несмотря на силы отталкивания положительных зарядов, ядра могут содержать десятки протонов, а с ними и нейтронов, втиснутых в крошечный объем и удерживаемых в нем на точных расстояниях сильным ядерным взаимодействием. Однако по мере исследования радиоактивности и все лучшего понимания того, как ядра распадаются (посредством деления) и составляются (посредством слияния), нам становилось ясно, что существует еще немало явлений, которые требуется объяснить.

Прежде всего, пережигание водорода в гелий, происходящее в недрах Солнца посредством слияния ядер, подразумевает использование еще одной частицы, нейтрино, которая преобразует протон в нейтрон. В 1930-х существование нейтрино лишь предполагалось — оно позволяло объяснить распад нейтрона на протон и электрон, то есть бета-радиоактивный распад. Однако в 1956 году нейтрино обнаружили и выяснилось, что массы у этой частицы практически нет. То есть даже в 1930-х в квантовой физике оставалось немало провисавших концов. Попытки связать их приводили в 1940-х и 1950-х к обнаружению других частиц — семейство их все разрасталось.

Вот из этих поисков и выросла стандартная модель, представляющая собой генеалогическое древо элементарных частиц. Существует три базовых типа фундаментальных частиц: «адроны», состоящие из «кварков», «лептоны», к которым относятся электроны, и, наконец, «бозоны» — частицы, служащие, подобно фотонам, переносчиками взаимодействия. Каждый из кварков и лептонов имеет соответствующую ему античастицу.

**Кварки** В 1960-х физики, обстреливая электронами протоны и нейтроны, установили, что последние содержат в себе частицы еще более мелкие, получившие название «кварков». Всего их три. Они обладают тремя «цветами» — красным, синим и зеленым. Точно так же, как электроны и протоны несут электрический заряд, кварки несут «цветной заряд», который сохраняется при переходе кварка из одного типа в другой. К видимым цветам света цветной заряд

## Кварки

Название «кварк» позаимствовано из «Поминок по Финнегану» Джеймса Джойса, где это слово использовано для описания криков морских чаек. У Джойса чайки испускают «три кварка», или троекратное ура.

**1930**

Вольфганг Паули предсказывает существование нейтрино

**1956**

Нейтрино обнаружено

**1960-е**

Выдвигается идея о существовании кварков

**1995**

Обнаружен топ-кварк (t-кварк)



**Творческий разум человека... проявляет себя загадочным образом, — совсем как те элементарные частицы, что обретают мгновенное существование в огромных циклотронах только затем, чтобы исчезнуть, подобно бесконечно малым призракам**

**Сэр Артур Эддингтон, 1928**

никакого отношения не имеет — просто физикам понадобилось придумать какие-то обозначения для причудливых квантовых свойств кварков.

Подобно тому как электрические заряды порождают силу, цветные заряды (кварки) также взаимодействуют друг с другом. Переносчик цветового взаимодействия — частицы, именуемые «глюоны». Цветовое взаимодействие усиливается с ростом расстояния между кварками, поэтому они держатся поближе друг к другу, словно стянутые резинкой. Из-за того, что связи, создаваемые полем цветового взаимодействия, так сильны, кварки не могут существовать по отдельности, им приходится создавать комбинации, не имеющие цветного заряда. Одна из комбинаций, трехкратная, называется «барионом» — это обычные протоны и нейтроны, другая — пара кварк-антикварк, именуется «мезоном».

Помимо цветных зарядов кварки обладают «ароматами» шести типов. Пары кварков образуют «поколения» с возрастающей массой. Самые легкие — «нижние» и «верхние» кварки, за ними идут «странные» и «очарованные», а за ними «прелестные» и «истинные». «Верхние», «очарованные» и «истинные» кварки имеют электрические заряды, равные  $+\frac{2}{3}$ , а «нижние», «странные» и «прелестные» — равные  $-\frac{1}{3}$ . То есть равные кварки обладают дробными зарядами — в сравнении с  $+1$  протона и  $-1$  электрона. Таким образом, для образования протона требуется три кварка (два «верхних» и один «нижний») и для образования нейтрона тоже три (один «верхний» и два «нижних»).

**Лептоны** Частицы второго класса, лептоны, родственны электронам, которые также входят в этот класс. Они тоже образуют три поколения с возрастающими массами: электроны, мюоны и тау. Мюоны в 200 раз тяжелее электрона, тау — в 3700 раз. Все лептоны имеют отрицательный электрический заряд, равный единице. И все обладают сопутствующей частицей, именуемой «нейтрино» (электронное, мюонное и тау-нейтрино). Нейтрино практически лишены массы и почти ни с чем не взаимодействуют. Они способны пронизать Землю, не заметив ее, поэтому регистрировать их трудно. У всех лептонов имеются античастицы.

**Взаимодействия** Действие фундаментальных сил осуществляется посредством обмена частицами. Точно так же, как электромагнитную волну можно представить в виде потока фотонов, слабое ядерное взаимодействие переносится W и Z частицами, а сильное — глюонами. Подобно фотонам, все эти частицы являются бозонами и все могут одновременно существовать в одном и том же

квантовом состоянии. Кварки и лептоны относятся к фермионам, этим свойством не обладающим.

**Расщепление частиц** Откуда мы столько всего знаем об элементарных частицах? Во второй половине XX века физики выясняли внутреннее устройство атомов и частиц, прибегая к грубой силе – разбивая их в мелкие куски. Об исследователях мира элементарных частиц говорили, что они берут сложно устроенные швейцарские часы, колотят по ним молотком, а потом разглядывают обломки, пытаясь сообразить, как эти часы работали. Колоссальные магниты ускорителей элементарных частиц разгоняют их до чрезвычайно высоких скоростей, а затем вбивают поток частиц либо в некоторую мишень, либо в другой, противоположно направленный поток. При небольших скоростях от частиц удастся отколоть лишь кусочки – частицы более легкие. Поскольку масса – это энергия, для высвобождения более тяжелых частиц требуется поток с очень высокой энергией.

Расколотив частицы в ускорителях, требуется определить затем, что представляют собой осколки, – это делается посредством фотографирования следов, которые они оставляют, проходя через магнитное поле. Положительно заряженные частицы отклоняются магнитным полем в одну сторону, отрицательно заряженные – в другую. Кроме того, масса частицы определяет быстроту ее проскакивания через детектор и степень искривления траектории магнитным полем. Путь легких частиц почти не искривляется, тяжелые могут описывать спирали, а то и петли. Получая изображения траекторий частиц в магнитном поле и сравнивая их с тем, что предсказывает теория, физики определяют, что представляет собой каждая из частиц.

Что так и не удалось включить в стандартную модель, так это гравитацию. Существование «гравитона», или переносящей гравитационное взаимодействие частицы, постулировано было, однако он так пока и остается абстрактной идеей. В отличие от света никаких свидетельств существования мелкой структуры гравитации не существует. Есть физики, которые пытаются включить гравитацию в стандартную модель, создав «теорию великого объединения» (ТВО). Однако до нее еще идти и идти.

		Фермионы		
Кварки	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>	
	верхние	очарованные	истинные	
	<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>	
	нижние	странные	прелестные	
Лептоны	<i>e</i>	$\mu$	$\tau$	
	электрон	мюон	тау	
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	
	электронное нейтрино	мюонное нейтрино	тау-нейтрино	

		Бозоны
Переносчики силы	$\gamma$	фотон
	<i>W</i>	W-бозон
	<i>Z</i>	Z-бозон
	<i>g</i>	глюон
	бозон Хиггса	?

# В сухом остатке В кругу семьи

# 37 Диаграммы Фейнмана

Диаграммы Фейнмана — это хорошо придуманные рисунки, которые можно использовать для быстрой записи сложных уравнений физики элементарных частиц. Любое взаимодействие частиц изображается тремя стрелками, которые встречаются в одной точке, две обозначают входящую и исходящую частицы, а еще одна — частицу, переносящую взаимодействие. Комбинируя такие рисунки, физики могут выяснять вероятности различных взаимодействий.

Ричард Фейнман — обаятельнейший физик из Калифорнии, занимавшийся элементарными частицами и прославившийся как замечательный лектор, искусный игрок на бонго и человек, много сделавший для развития физики. Он предложил новый символический язык для описания взаимодействий частиц, используемый по причине его простоты до сих пор. Для сжатого изображения сложных математических уравнений Фейнман просто рисовал стрелки.

Одна представляет входящую частицу, одна — исходящую, а еще одна линия, извилистая, изображает переносчика взаимодействия. Таким образом, любое взаимодействие частиц можно изобразить тремя линиями, встречающимися в одной точке, вершине. Взаимодействия более сложные строятся из нескольких таких элементарных рисунков.

Диаграммы Фейнмана — это не просто графические инструменты. Они не только позволяют физикам показывать механизмы взаимодействия элементарных частиц, но и помогают вычислять вероятность того, что такое взаимодействие произойдет.

Фейнман был так увлечен придуманными им диаграммами, что изобразил их на боку своего автофургона. Человек, спросивший его, зачем они там, услышал в ответ: «Затем, что я Ричард Фейнман».

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

### 1927

Начинается работа над квантовой теорией поля

### 1940-е

Разрабатывается квантовая электродинамика

**Рисунки** Диаграммы Фейнмана изображают взаимодействия, используя стрелки для показа путей частиц, которые в них участвуют. Время в диаграммах течет слева направо, поэтому входящий и уходящий электроны — это стрелки, направо и указывающие. И, как правило, наклонные, что изображает движение. Поскольку античастицы эквивалентны частицам, двигающимся во времени вспять, их стрелки указывают налево. Вот несколько примеров.

Эта диаграмма может представлять электрон, который испускает фотон. Входящий электрон (левая стрелка) испытывает в точке встречи трех линий электромагнитное взаимодействие, которое порождает другой электрон, уходящий (правая стрелка), и фотон (волнистая линия). Частица не указана — только механизм взаимодействия. Диаграмма может с таким же успехом изображать и протон, испускающий фотон.



Здесь входящий электрон или другая частица поглощает фотон и получается второй электрон, обладающий большей энергией.



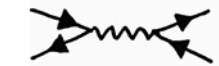
Здесь стрелки обращены в другую сторону, стало быть, это античастицы. Эта диаграмма может относиться к антиэлектрону, или позитрону (левая стрелка), поглощающему фотон, отчего появляется другой позитрон (правая стрелка).



А здесь электрон и позитрон встречаются, аннигилируют и порождают фотон чистой энергии.



Две вершины — или более — можно комбинировать, показывая последовательность событий. Здесь частица и античастица аннигилируют, создают фотон, который затем распадается на другую пару частица-античастица.



Вершины могут использоваться для представления множества различных типов взаимодействий. И для любых частиц, в том числе и кварков, а также для лептонов и их взаимодействий, включая электромагнитное, слабое или сильное. Все они следуют некоторым основным правилам. Должно происходить преобразование энергии, входящие и исходящие линии диаграммы должны представлять реальные частицы (такие, как протоны или нейтроны, но не свободные кварки, которые по отдельности существовать не могут), однако промежуточные этапы могут включать любые элементарные и виртуальные частицы — при условии, что под конец все они обращаются в частицы реальные.

1945

Создаются и используются атомные бомбы

1975

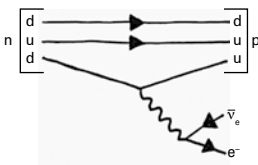
Предлагается квантовая хромодинамика

## Ричард Фейнман, 1918–1988

Ричард Фейнман был блестящим физиком и любителем валять дурака. На вступительных экзаменах в Принстон он набрал великолепные баллы и привлек внимание Эйнштейна. Работая в качестве ассистента в Манхэттенском проекте, он, по его словам, своими глазами видел испытательный взрыв атомной бомбы, сказав себе, что наблюдать за ним сквозь ветровое окно машины не опасно, поскольку стекло не пропускает ультрафиолетовые лучи. В стоявшем посреди пустыни Лос-Аламосе ему было скучно, и Фейнман пристрастился вскрывать запертые на кодовые замки сейфы с документацией, угадывая числа, которые его коллеги выбирали в качестве кода, скажем, основание натуральных логарифмов  $e = 2,71828\dots$  Он оставлял в сейфах шуточные записки, и коллеги перепугались, решив, что в их ряды затесался шпион. Кроме того, он развлечения ради начал играть на барабанах, заслужив в итоге репутацию большого чудака. После войны Фейнман перебрался в Калтех, где с наслаждением преподавал,

получив от студентов прозвище Великий Объяснитель, и написал немало книг, в том числе знаменитые «Фейнмановские лекции по физике». Он входил в состав комиссии, которая расследовала причины взрыва космического шаттла «Челенджер», и выступал на ее заседаниях с обычной для него прямотой. В числе заслуг Фейнмана — разработка КЭД, физики супержидкостей и слабого ядерного взаимодействия. В более поздние годы своей карьеры он выступил с лекцией «Там, внизу, еще много места», положившей начало разработке квантовых компьютеров и нанотехнологий. Фейнман всегда питал склонность к авантюрам и очень любил путешествовать. Мастерски оперируя символами, он попытался даже расшифровать письменность майя. Его коллега, физик Фримен Дайсон, написал однажды, что Фейнман — «наполовину гений, наполовину клоун», но впоследствии заменил эту характеристику на «законченный гений, законченный клоун».

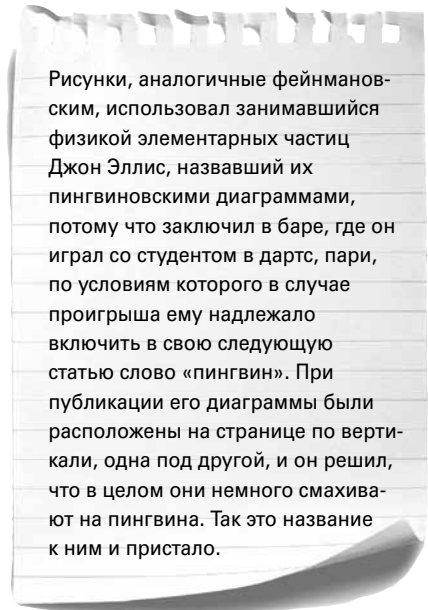
А эта картинка показывает бета-радиоактивный распад. Слева нейтрон, состоящий из двух «нижних» кварков и одного «верхнего». Он превращается в протон, который состоит из двух «верхних» кварков и одного «нижнего», испуская также электрон и антинейтрино. В этом процессе участвуют два взаимодействия. «Нижний» кварк нейтрона превращается в «верхний», выбрасывая  $W$ -бозон (показан волнистой линией), переносчик слабого ядерного взаимодействия. Затем  $W$ -бозон распадается на электрон и антинейтрино. Среди продуктов взаимодействия  $W$ -бозон отсутствует, однако участвует в нем на промежуточной стадии.



**Вероятность** Эти диаграммы – не просто удобный и быстрый способ визуального представления взаимодействий, они могут также сказать, насколько эти взаимодействия вероятны. То есть они дают и мощное математическое представление сложных уравнений. Чтобы понять, насколько вероятно взаимодействие, необходимо знать, сколько существует путей, позволяющих получить его конечный результат. Тут-то диаграммы и оказываются очень кстати. Нарисовав все различные варианты взаимодействия, все образованные различными промежуточными взаимодействиями пути от его начальных условий к конечным, вы можете получить вероятность каждого, просто пересчитав рисунки.

**КЭД** Идея диаграмм пришла Фейнману в голову в 1940-х, когда он занимался разработкой квантовой электродинамики. Мысль, лежавшая в основе КЭД, очень похожа на принцип Ферма, описывающий распространение света: свет идет по всем возможным путям, но наиболее вероятным является самый короткий из них, и по нему свет проходит в фазе. Применение аналогичной идеи к электромагнитным полям позволило разработать после 1927-го квантовую теорию поля, что и привело к КЭД.

КЭД описывает электромагнитные взаимодействия, осуществляемые посредством обмена фотонами, и тем самым соединяет в себе квантовую механику, описание электрического поля и элементарные частицы. Именно пытаясь выявить вероятности всех возможных взаимодействий, Фейнман и пришел к идее их графического представления. После создания КЭД физики распространили эту картину на цветовое поле кварков, создав теорию, названную «квантовой хромодинамикой», или КХД. А затем КЭД была объединена со слабым ядерным взаимодействием, и получилось «электро-слабое» взаимодействие.



Рисунки, аналогичные Фейнмановским, использовал занимавшийся физикой элементарных частиц Джон Эллис, назвавший их пингвиновскими диаграммами, потому что заключил в баре, где он играл со студентом в дартс, пари, по условиям которого в случае проигрыша ему надлежало включить в свою следующую статью слово «пингвин». При публикации его диаграммы были расположены на странице по вертикали, одна под другой, и он решил, что в целом они немного смахивают на пингвина. Так это название к ним и пристало.

## В сухом остатке Трехногий подход



# 38 Частица Бога

**В 1964 году молодой физик Питер Хиггс, прогуливаясь по нагорьям Шотландии, размышлял о том, откуда берется масса частиц. Он называл это «своей великой идеей». Частицы выглядят более массивными, потому что они замедляются в силовом поле, известном ныне как поле Хиггса. Переносчиком поля является бозон Хиггса, который лауреат Нобелевской премии Леон Ледерман назвал «частицей Бога».**

Почему что-либо вообще обладает массой? Грузовик тяжел, поскольку содержит множество атомов, каждый из которых также относительно тяжел. Сталь содержит атомы железа, не самые, впрочем, тяжелые из элементов периодической таблицы. Но почему атом тяжел? В конце концов, он состоит по большей части из пустоты. Почему протон тяжелее электрона, или нейтрино, или фотона?

Хотя все четыре фундаментальные силы были в 1960-х хорошо известны, каждая из них опиралась на разные частицы-транспортёры. Фотоны переносят информацию в электромагнитных взаимодействиях, глюоны связывают кварки в сильном ядерном взаимодействии, а  $W$ - и  $Z$ -бозоны являются носителями слабого ядерного взаимодействия. Однако фотоны массы не имеют, между тем как  $W$ - и  $Z$ -бозоны — частицы очень массивные, в сотни раз массивнее протона. Почему все они разные? Это расхождение бросается в глаза особенно сильно, когда теории электромагнетизма и слабого взаимодействия объединяются в теории электро-слабого взаимодействия. Ведь она не предсказывает, что носители слабого ядерного взаимодействия,  $W$ - и  $Z$ -бозоны, должны иметь какую-то массу. Им следует походить на фотон, у которого массы попросту нет. И любые другие попытки объединения фундаментальных взаимодействий, предпринимаемые теорией Великого объединения,

утыкаются в эту же проблему. Переносчикам взаимодействия масса не нужна. Почему же все они не уподобляются фотону?

**Медленное движение** Великая идея Хиггса состояла в том, чтобы представить себе, как эти переносчики взаимодействия замедляются, проходя через фоновое силовое поле. Теперь оно называется «полем Хиггса», а переносящие его бозоны именуют «бозонами Хиггса». Представьте, что вы роняете бусинку в стакан. Если он наполнен водой, времени на то, чтобы достичь его дна, у бусинки уйдет больше, чем в случае пустого стакана. То есть все выглядит так, точно в воде бусинка становится более массивной, — силе притяжения требуется большее время, чтобы протащить ее через воду. То же самое можно сказать и о ваших ногах, когда вы идете по пояс в воде, — они кажутся более тяжелым, и движение ваше замедляется. Вот и бусинка замедлилась бы еще сильнее, тонула бы дольше, если б стакан содержал не воду, а сироп. Аналогичным образом действует поле Хиггса. Взаимодействие с ним замедляет частицы, которые переносят другие взаимодействия, по сути дела наделяя их массой. На  $W$ - и  $Z$ -бозоны оно действует сильнее, чем на фотоны, отчего они и выглядят более тяжелыми.

В поле Хиггса мы наблюдаем примерно то же, что происходит с электроном, движущимся сквозь кристаллическую решетку положительно заряженных ядер, через металл. Электрон замедляется, поскольку его притягивают к себе все положительные заряды, и оттого он кажется более массивным, чем в отсутствие этих ионов. Так выглядит переносимое фотонами электромагнитное взаимодействие. Поле Хиггса работает подобным же образом, только переносчиками его являются бозоны Хиггса. Представьте себе кинозвезду, пришедшую на вечеринку, где полным-полно Хиггсов. Пересекая комнату, звезда испытывает некоторые затруднения, поскольку все разговоры вокруг нее стихают.

Если поле Хиггса наделяет переносящие взаимодействие бозоны массой, то какова масса самого бозона Хиггса? И откуда она берется? Не похоже ли это на историю с курицей и яйцом? К сожалению, ни одна из теорий не предсказывает массу самого бозона Хиггса, предсказывая, впрочем, необходимость его присутствия в стандартной модели мира элементарных частиц. Физики надеются увидеть его, но не знают, каких

**«Очевидный шаг состоял в том, чтобы испытать эту идею на самой простой из существующих калибровочных теорий, на электродинамике, — нарушить ее симметрию и посмотреть, что при этом получится»**

**Питер Хиггс, р. 1929**

**1964**

Хиггса осеняет мысль о том, откуда берется масса

**2007**

В ЦЕРНе завершается строительство Большого адронного коллайдера

## Нарушение симметрии в магнитах

При очень высоких температурах упорядоченность ориентации всех атомов магнита нарушается, их магнитные поля рассогласовываются и магнит утрачивает магнитные свойства. Однако, когда температура падает ниже определенной точки, называемой «температурой Кюри», магнитные диполи снова выстраиваются по порядку и создают общее магнитное поле.

\* В 2013-м ученые ЦЕРНа сообщили, что обнаруженная ими в 2012-м частица и есть бозон Хиггса.

это может потребовать усилий и когда будет достигнут успех (бозон все еще не обнаружен\*). Поиск частиц со свойствами бозона Хиггса продолжается, и мы знаем, что масса его должна быть больше, чем энергия, уже достигнутая экспериментально. Получается, что он очень тяжел, однако, чтобы узнать насколько, придется подождать.

**Дымящийся револьвер** Новейшим ускорителем, который может позволить приглядеться к частице Хиггса, является построенный в ЦЕРНе, Швейцария, Большой адронный коллайдер (БАК). ЦЕРН (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* – Европейский совет по ядерным исследованиям) – это расположенная недалеко от Женевы огромная лаборатория физики элементарных частиц. В ней построены кольцевые туннели, самый большой имеет в длину 27 км и лежит на глубине ста метров. Гигантские магниты БАК ускоряют пучок протонов, проходящий по этому туннелю. Пока протоны движутся по кругу, в них постоянно подкачивается энергия, отчего их скорость все возрастает и возрастает. Создаются два встречных пучка, и, когда они достигают максимальной скорости, их направляют друг на друга и происходит лобовое столкновение ускоренных протонов. Огромная энергия протонов приводит к временному образованию целого спектра массивных частиц, которые регистрируются детекторами, – если же срок жизни частиц невелик, детекторы регистрируют продукты их распада. Задача БАК состоит в том, чтобы обнаружить среди миллиардов характерных следов различных частиц хотя бы намек на присутствие среди них бозонов Хиггса. Физики знают, что нужно искать, однако им от этого не легче. Бозон Хиггса может возникнуть – при достаточно высоких энергиях – лишь на долю секунды и распастся, породив каскад других частиц. Поэтому искать приходится не сам бозон Хиггса, но, так сказать, дым от выстрела, а затем, собрав воедино продукты распада бозона, сделать достоверный вывод о том, что он тут недавно побывал.

**Нарушение симметрии** Когда может появиться бозон Хиггса? И как нам удастся перейти от него к фотонам и другим бозонам? Поскольку бозон Хиггса должен быть очень тяжелым, он может появляться лишь при экстремальных энергиях и, в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга (см. с. 104), лишь на очень короткий промежуток времени. Согласно теории, в ранней вселенной все взаимодействия были объединены в одно сверхвзаимодействие. А пока вселенная остывала, от него вследствие процесса, называемого «нарушением симметрии», отпочковались четыре фундаментальных взаимодействия.

Слова «нарушение симметрии» наводят на мысль, что речь идет о чем-то головоломном, однако на деле все довольно просто. Они описывают точку, в которой некоторое событие лишает систему симметрии. Пример дает круглый обеденный стол с салфетками и столовыми приборами. Он симметричен; какое место за ним ни займи, стол будет выглядеть одинаково. Но если один из сидящих за столом уберет свою салфетку, симметрия исчезнет и вы сможете указать свое положение относительно этого человека. Стало быть, произошло нарушение симметрии. Одно это событие может породить целую череду других: все, сидящие слева от того человека, тоже уберут со стола свои салфетки, подражая ему. А может случиться и противоположное: салфетки исчезнут справа от него. Однако любые последующие события будут запущены первым, чисто случайным. Вот так же, когда вселенная остывала, некоторые события привели к тому, что взаимодействия начали обособляться, одно за другим.

Даже если ученым не удастся зарегистрировать с помощью БАКа бозон Хиггса, результат все равно получится интересный. Нейтрино отделено от топ-кварка четырнадцатую порядками величины массы, и стандартная модель должна найти этому какое-то объяснение. Сделать это непросто даже при наличии бозона Хиггса, которого у нас пока нет. Если мы найдем эту «частицу Бога», все будет хорошо, но если нет, тогда придется пересматривать стандартную модель. А это потребует новой физики. Мы думаем, что знаем все существующие во вселенной частицы, — только бозон Хиггса и остается последним недостающим звеном.

**В сухом остатке**  
Плыть против течения

# 39 Теория струн

Несмотря на то что большинство физиков предпочитает работать с успешной стандартной моделью, пусть она даже и не полна, есть и такие, кто старается построить новую физику, не дожидаясь, когда эксперименты уничтожат стандартную модель или подтвердят ее. Некоторые физики, по-новому взглянув на дуализм волна-частица, стараются объяснить структуру мира фундаментальных частиц, описывая их не как твердые сферы, но как бегущие по струне волны. Эта увлекшая воображение журналистов идея известна ныне как «теория струн».

Ученых, работающих с теорией струн, не удовлетворяют представления о фундаментальных частицах — кварках, электронах и фотонах — как о неделимых сгустках массы или энергии. Структуры, которые придают им определенную массу, заряд или связанную с ними энергию, подразумевают, с точки зрения этих ученых, другой уровень организации. Они верят, что такие структуры обладают скрытой в них гармонией. Каждый квант массы или энергии — это гармонический тон тонкой струны. Таким образом, частицу можно мыслить не как твердый шарик, но как вибрирующие участки или петли струны. В некотором смысле это новая вспышка кеплеровской любви к идеальным геометрическим твердым телам. Частицы выглядят как наборы нот (что предполагает наличие гармонического ряда), играемых на одной-единственной струне.

**Вибрации** Струны этой теории не похожи, скажем, на гитарные струны. Гитарная струна вибрирует в трех пространственных измерениях, хотя можно свести это число и к двум, если представить себе, что она движется вверх-вниз в одной плоскости, включающей в себя всю ее длину. Субатомные струны вибрируют всего в одном измерении, что

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1921**

Предлагается теория Калуцы—Клейна, объединяющая гравитацию и электромагнетизм

**1970**

Ёитиро Намбу описывает сильное ядерное взаимодействие, используя квантовую механику струн

отличает их от точечных частиц, у которых число измерений и вовсе равно нулю. Вся их протяженность нам не видна, однако, разрабатывая математический аппарат теории струн, ученые рассчитали их вибрации в гораздо большем числе измерений — до десяти, а то и одиннадцати. У нашего с вами мира имеется три пространственных измерения и одно временное. Но теоретики струн считают, что измерений может существовать намного больше, а мы просто не видим их: все они искривлены так, что мы их не замечаем. Вот в этих других мирах и вибрируют струны частиц.

Струны могут быть свободными или замкнутыми в петлю, однако в остальном они одинаковы. И все разнообразие фундаментальных частиц возникает из-за различий в вибрациях струны, ее обертонов, а не материала, из которого струна состоит.

**Неслабая идея** Теория струн — это математика, и ничего больше. Никто и никогда струны не видел, никто не предложил способа, который позволил бы выяснить, существует ли хотя бы одна. То есть экспериментов, позволяющих убедиться в верности или неверности теории, тоже никто пока не придумал. Говорят также, что число теорий струн равно числу их теоретиков. Все это ставит теорию в неудобное положение.

Философ Карл Поппер считал, что науку двигают вперед главным образом ложные идеи. Вы выступаете с некоторой идеей, проверяете ее экспериментально, и, если она оказывается ложной, значит, что-то можно отбросить наверняка, то есть вы узнали нечто новое, а наука шагнула вперед. Если же наблюдение удовлетворяет вашей модели, вы ничего нового не узнали. Поскольку теория струн еще не разработана окончательно, она не содержит пока определенно фальсифицируемых гипотез.

А поскольку вариантов теории существует так много, некоторые ученые считают, что к настоящей науке она отношения не имеет. Доводы в пользу и против ее полезности заполняют разделы писем в журналах и даже газетах, но теоретики струн все равно считают свои поиски делом стоящим.

**Теория всего** Чтобы отобразить весь зоопарк частиц и взаимодействий в виде единой структуры, теория струн пытается приблизиться к «теории всего» — одной-единственной теории, которая объединит все четыре фундаментальных взаимодействия (электромагнетизм, гравитацию, сильное и слабое ядерные взаимодействия),

«Эти дополнительные измерения и, следовательно, множество вариантов вибрации струны во множестве направлений оказываются ключом к описанию всех известных нам частиц»

Эдвард Виттен, р. 1951

### Середина 1970-х

Получена квантовая теория гравитации

### 1984–1986

Быстрое развитие теории струн, «описывающей» все частицы

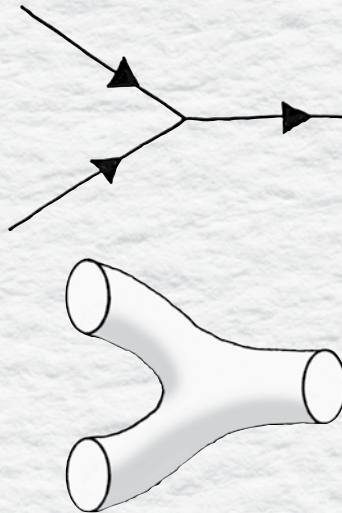
### 1990-е

Виттен и другие разрабатывают М-теорию с 11 измерениями



## M-теория

Струны — это по существу своему линии. Однако в многомерном пространстве они представляют собой ограниченный случай геометрий, которые могут включать в себя листы и многомерные фигуры. Такая обобщенная теория называется «M-теорией». Что означает «M», никто не знает, это может быть и «мембрана», и «мистика». Частица, движущаяся в пространстве, выписывает линию; если окунуть точечную частицу в чернила, она оставит линейный след, который мы называем ее «мировой линией». Струна, скажем, петлеобразная оставит след в виде цилиндра. Мы говорим, что она оставляет «мировой лист». Там, где эти листы пересекаются, там, где струны прерываются и воссоединяются, возникает взаимодействие. Таким образом, M-теория изучает формы всех таких листов в 11-мерном пространстве.



объяснит происхождение масс частиц и всех их свойств. Это была бы теория очень глубокая, всеохватная. В 1940-х сам Эйнштейн пытался объединить квантовую теорию с гравитацией, но не преуспел, как и никто другой с той поры. Над Эйнштейном за эти его усилия посмеивались, считая их пустой тратой времени, а достижение его цели невозможным. Теория струн вводит в свои уравнения и гравитацию, отчего ее потенциальная мощь заставляет людей стремиться к достижению той же цели. Однако к формулировке такой теории и уж тем более к проверке ведет очень длинный путь.

Благодаря красоте ее математического аппарата и новизне теория струн влечет к себе многих. В 1920-х Теодор Калуца использовал гармоника как новый способ описания некоторых необычных свойств частиц. Физики сообразили, что этот же математический аппарат можно использовать для описания и квантовых явлений. В сущности, волновая математика хорошо работает и в квантовой механике, и в ее приложениях к физике частиц. Все это развилось в ранние теории струн. Вариантов у них было много, а до всеохватной теории им было далеко.

«Теория всего» является целью некоторых физиков, как правило, редукционистов, считающих, что если вы понимаете строительные блоки, то поймете и мир в целом. Если вы понимаете атом, построенный с помощью вибрирующих струн, то можете вывести из этого знания и биологию, и химию, и все что угодно.

Другие ученые считают такие взгляды смехотворными. Что может сказать знание атомов о социальной теории, эволюции или налогах? Просто увеличивая масштаб, нельзя описать все на свете. Противникам этого подхода представляется, что такая теория описывает мир как бессмысленный шум субатомных взаимодействий, что она нигилистична и неверна.

Редукционисты игнорируют очевидное макроскопическое поведение, такое как структура урагана или хаос, — физик Стивен Вайнберг назвал их теорию «холодной и безликой». Ее следует принимать такой, какая она есть, — и не потому, что она вам по душе, а потому, что так, видите ли, устроен мир».

Теория, а вернее, теории струн все еще пребывают в состоянии непрерывного изменения. Окончательная теория не сформулирована, — впрочем, если учесть, насколько сложной стала физика и какое количество деталей следует охватить, это, естественно, требует немалого времени. В картине вселенной, как картине звучания многих гармоний, есть своя прелесть. Однако сторонники этой теории зачастую слишком сухи, они так увлекаются мелкими деталями, что начинают недооценивать значение крупных структур. И потому теоретикам струн приходится оставаться пассивными наблюдателями, ожидающими появления более сильных концепций. И все же, с учетом самой природы науки, хорошо уж и то, что они занимаются поисками — и не в самых привычных местах.

**«Мне не нравится, что у них нет никаких расчетов. Не нравится, что они не подвергают свои идеи проверке. Не нравится, что для всего, не согласующегося с опытом, они спешат состряпать объяснение, найти увертку, которая позволит сказать: «Ну, может, это все-таки и верно»»**

**Ричард Фейнман, 1918–1988**

## В сухом остатке Струны мировой гармонии

# 40 Специальная теория относительности

Ньютоновские законы описывают движение большинства физических тел, от крикетных мячиков до автомобилей и комет. Однако Альберт Эйнштейн показал в 1905 году, что при очень высоких скоростях происходят странные вещи. Физическое тело, скорость которого близка к скорости света, становится тяжелее, сжимается и стареет намного медленнее. Причина в том, что двигаться быстрее, чем свет, невозможно и потому приближение к пределу скоростей искажает само пространство и время.

\* Рекламный слоган фильма Ридли Скотта «Чужой» (1979)

Звуковые волны распространяются в воздухе, но пройти через пустое пространство, в котором нет атомов, они не могут. Поэтому слова «в космосе твоих воплей никто не услышит»\*, безусловно, верны. Однако свет способен распространяться и в пустом пространстве — мы знаем это хотя бы потому, что видим Солнце и звезды. Но, может, это не пустота, а передающая среда, своего рода электрический воздух, в котором распространяются электромагнитные волны?

**Самое непостижимое в мире — это его хоть какая-то а постижимость**

Альберт Эйнштейн, 1879–1955

Физики конца XIX века считали, что космос пропитан неким газом, или «эфиром», переносящим свет.

**Скорость света** Но в 1887 году был поставлен знаменитый эксперимент, доказавший, что никакого эфира нет. Поскольку Земля вращается вокруг Солнца, ее положение в пространстве непрерывно изменяется. Если существует неподвижный эфир, решили Альберт Михельсон и Эдвард Морли, можно попробовать обнаружить движение Земли относительно него — и придумали остроумный эксперимент. Они

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
1887

Михельсону и Морли не удается подтвердить существование эфира

1905

Эйнштейн публикует специальную теорию относительности

## Парадокс близнецов

Может ли растяжение времени сказываться на людях? Еще как может. Если ваш однояйцевый близнец улетит в космос на достаточно быстром корабле и на достаточно долгое время, он будет стареть медленнее, чем вы, оставшийся на Земле. Вернувшись, он увидит, что вы состарились, а вы увидите, что он на удивление молод. Это кажется невозможным, однако никакого парадокса тут нет, поскольку находящиеся в одном пространстве близнецы могут

испытывать воздействие мощных сил, которые и делают такие изменения возможными. Вследствие временного сдвига события, которые представляются одновременными в одной системе отсчета, могут не выглядеть таковыми в другой. Мало того, что замедляется время, тела еще и сжимаются в направлении движения. Сами они, двигающиеся с высокой скоростью, этого не замечают, зато замечает сторонний наблюдатель.

сравнили два луча света, испущенных под прямым углом один к другому и отраженных расположенными на одинаковых расстояниях от его источника зеркалами. У пловца, который переплывает реку туда и обратно, уходит на это меньше времени, чем если проплыть ровно такое же расстояние, двигаясь против течения, а затем по нему, — Михельсон и Морли ожидали получить такой же результат и для света. Но не получили — оба луча вернулись к источнику одновременно. Совершенно независимо от того, в каком направлении распространялся свет и в каком двигалась Земля. На скорости света движение Земли никак не сказывалось. Этот эксперимент показал, что эфира не существует, — однако чтобы понять это, понадобился Эйнштейн.

В соответствии с принципом Маха (см. главу 1), это означает, что никакой фиксированной решетки, или системы координат, на фоне которой движутся физические тела, не существует. В отличие от морских или звуковых волн свет всегда распространяется с одной и той же скоростью, и это противоречит нашему опыту, гласящему, что скорости движения складываются и вычитаются. Если вы ведете машину на скорости 50 км/ч, а другая обгоняет вас, двигаясь со скоростью 65 км/ч, это выглядит так, точно вы стоите у обочины, а вторая машина проезжает мимо на скорости 15 км/ч. Но разгонись вы хоть до 100 км/ч, свет все равно обгонит вас с неизменной скоростью. Зажгите фонарик, сидя

**1971**

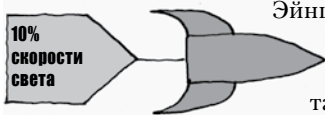
Растяжение времени демонстрируется часами, летающими на самолетах

**Концепция светового эфира окажется излишней, поскольку... не удастся ввести ни пространства, пребывающего в абсолютном покое и разделенного особыми свойствами, ни вектора скорости, соотнесенного с точкой пустого пространства, в которой происходят электромагнитные процессы**

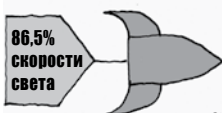
**Альберт Эйнштейн, 1905**

в кресле реактивного самолета или в седле велосипеда, свет будет распространяться со скоростью 300 миллионов метров в секунду. Именно это постоянство скорости света и озадачило Эйнштейна в 1905 году, приведя его к разработке специальной теории относительности. Никому в ту пору не известный чиновник швейцарского патентного бюро Эйнштейн в свободное время выводил уравнения своей теории. И специальная теория относительности стала крупнейшим со времен Ньютона шагом вперед, революцией в физике. Эйнштейн начал с предположения, что скорость света постоянна для любого наблюдателя, независимо от того, как быстро движется он сам. Но если скорость не меняется, рассудил Эйнштейн, значит, должно меняться что-то еще — чтобы скомпенсировать эту неизменность.

**Пространство и время** Опираясь на идеи, развитые Эдвардом Лоренцем, Джорджем Фитцджеральдом и Анри Пуанкаре, Эйнштейн показал, что пространство и время должны изменяться, иначе они не будут отвечать тому, что видят наблюдатели, перемещающиеся со скоростью, близкой к скорости света. Три пространственных измерения и одно временное образуют четырехмерный мир, с которым работал Эйнштейн. Скорость есть расстояние, деленное на время, и для того, чтобы не позволить чему-либо перемещаться со скоростью большей скорости света, расстояния должны сжиматься, а время замедляться. Поэтому ракета, улетающая от вас со скоростью, близкой к световой, должна выглядеть укороченной, а время на ней должно течь медленнее, чем ваше.



Эйнштейн понял, что следует переписать законы движения для наблюдателей, которые движутся с разными скоростями. Он отверг существование стационарной системы отсчета, такой как эфир, и постановил, что любое движение относитель-



отно, однако привилегированной точки наблюдения не существует. Если вы сидите в вагоне поезда и видите за окном другой поезд, движущийся, вы не можете знать, движется тот поезд или ваш. Более того, даже видя перрон, у которого стоит ваш поезд, вы можете сказать только, что не движетесь относительно перрона. Мы же

не ощущаем вращения Земли вокруг Солнца и не замечаем ни движения Солнца, ни того, как наш Млечный Путь притягивается галактическим скоплением Девы или галактиками, которые лежат за ним. Все, что мы знаем на опыте, это относительное движение между нами и перроном.

Эйнштейн назвал эти различные точки наблюдения инерциальными системами отсчета.

Инерциальные системы отсчета движутся одна относительно другой с постоянной скоростью, не испытывая ускорения или воздействия сил.

Таким образом, сидя в машине, идущей со скоростью 50 км/ч, вы находитесь в одной

инерциальной системе отсчета и чувствуете себя точно так же, как чувствовали бы в поезде, набравшем скорость 100 км/ч (другая инерциальная система отсчета), или в самолете, который летит со скоростью 500 км/ч (еще одна). Эйнштейн утверждал, что законы физики во всех инерциальных системах отсчета одинаковы. Если вы уроните карандаш в машине, поезде или самолете, он полетит на пол с одним ускорением.

**Медленнее и тяжелее** Перейдя к осмыслению относительного движения со скоростями, близкими к скорости света, — максимальной скорости, какую может развить материя, Эйнштейн предсказал, что время при таком движении будет замедляться. Растяжение времени означает, что в различных инерционных системах отсчета часы должны идти по-разному. Что и было доказано в 1971 году: две пары идентичных атомных часов поместили в обычные рейсовые самолеты, которые дважды обогнули земной шар, одна пара летела на восток, другая на запад. А когда их сравнили с пятью часами, простоявшими все это время на земле, выяснилось, что в сравнении с ними вся четверка отстала на долю секунды — в согласии со специальной теорией относительности Эйнштейна.

Еще одно обстоятельство, не позволяющее переходить световой барьер скорости, состоит в том, что с увеличением скорости тела возрастает и его масса — в соответствии с  $E = mc^2$ . При достижении скорости света тело становится бесконечно массивным и дальнейшее его ускорение невозможно. Тело, обладающее массой, достичь скорости света и не может — может лишь приблизиться к ней, поскольку чем ближе тело подбирается к этой скорости, тем тяжелее становится и тем труднее его ускорить. Свет состоит из не имеющих массы фотонов, на которые это правило не распространяется.

Специальная теория относительности Эйнштейна радикальным образом отклонялась от того, что происходило в физике до ее появления. Эквивалентность массы и энергии шокировала физиков, да и растяжение времени и увеличение массы — тоже. И хотя во время публикации этой теории Эйнштейн был в науке никем, его статью прочитал Макс Планк, и, возможно, то, что он принял идеи Эйнштейна, и привело к их признанию, к тому, что от них не отмахнулись. Планк понял красоту уравнений Эйнштейна и постарался, чтобы Эйнштейн обрел всемирную славу.

**«Двигаться быстрее света невозможно, да оно и нежелательно — то и дело сдувает шляпу»**

Вуди Аллен

**В сухом остатке**  
**Движение относительно**



# 41 Общая теория относительности

**Общая теория относительности Эйнштейна, соединившая гравитацию со специальной теорией относительности, произвела революцию в наших представлениях о пространстве и времени. Выйдя за пределы законов Ньютона, она раскрыла перед нами вселенную черных дыр, кротовых нор и гравитационных линз.**

Представьте себе человека, прыгающего с крыши высотного здания или из самолета — с парашютом, конечно. Сила притяжения заставляет его лететь к земле с ускорением. Альберт Эйнштейн понял, что в таком состоянии свободного падения воздействия силы тяжести он не испытывает, то есть он невесом. Именно так космонавты во время тренировок получают представление о невесомости, с которой столкнутся в космосе, — их помещают в реактивный самолет (получивший симпатичное прозвище «рвотная комета»), который следует по траектории кабинки американских горок. Пока он идет вверх, пассажиров вдавливают в кресла, они испытывают большую, чем обычная, силу тяжести. Набрав высоту, самолет камнем падает вниз, и сила тяжести исчезает, люди могут плавать по воздуху самолетного салона.

**Ускорение** Эйнштейн сообразил, что это ускорение эквивалентно силе притяжения. И стало быть, точно так же, как специальная теория относительности описывает то, что происходит в инерциальных системах отсчета, движущихся одна относительно другой с постоянной скоростью, гравитация есть следствие пребывания в ускоряющейся системе отсчета. Он назвал это самой счастливой мыслью своей жизни.

В следующие несколько лет Эйнштейн исследовал то, что из этой мысли проистекало. Обсуждая свои идеи с доверенными коллегами и облекая их в математические одежды, он постепенно построил полную теорию гравитации, названную им «общей теорией

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1687**

Ньютон формулирует закон тяготения

**1915**

Эйнштейн публикует общую теорию относительности

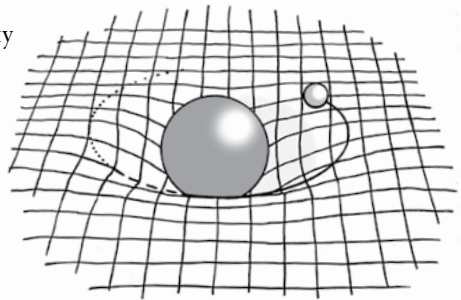
## «Время, пространство и гравитация не могут существовать отдельно от материи»

Альберт Эйнштейн, 1915

относительности». Год ее публикации, 1915-й, стал для него особенно деятельным. Едва опубликовав теорию, Эйнштейн несколько раз пересмотрел ее. Коллеги только дивились скорости, с которой он продвигался вперед. Помимо прочего, теория давала несколько допускающих экспериментальную проверку предсказаний, в том числе идею о том, что луч света должен искривляться гравитационным полем и что вследствие притяжения Солнца Меркурий должен двигаться по своей эллиптической орбите медленнее, чем то предсказывается уравнениями Кеплера.

**Пространство-время** В общей теории относительности три пространственных измерения и одно временное образуют четырехмерное пространство. Скорость света остается постоянной, и ничто превысить ее не может. При движении и ускорении искажается, чтобы сохранить постоянство скорости света, пространственно-временная метрика.

Наилучшее представление об общей теории относительности можно получить, представив себе пространство-время как лист резины, натянутый поверх лишнего столешницы стола. Если положить на него массивные шарики, они слегка продавят резину — то есть пространство-время — вокруг себя. Представьте, что вы помещаете на резину шарик, изображающий Землю. В листе резины образуется вмятина. Если вы теперь бросите на него шарик поменьше, астероид, он покатится по склону вмятины к Земле. Это покажет вам, как он испытывает притяжение. Если вмятина, образованная Землей, достаточно глубока, а маленький шарик движется достаточно быстро, он — совсем как бесстрашный мотоциклист, гоняющий по наклонному треку, — может начать вращаться по круговой орбите — вот вам и Луна. Всю вселенную можно представить себе как гигантский лист резины. И каждая из планет, звезд и галактик образует в нем вмятины, способные притягивать или отталкивать пролетающие мимо, точно мячики по неровному полю для гольфа, тела меньших размеров.



1919

Наблюдения, проведенные во время солнечного затмения, подтверждают теорию Эйнштейна

1960-е

В космосе обнаружены свидетельства существования черных дыр



попробовали проверить предсказания Эйнштейна во время полного солнечного затмения. То был один из величайших моментов его жизни — теория, которую некоторые считали безумной, оказалась истинной.

**Норы и дыры** Искривление лучей света подтверждено ныне и для света, проходящего через космос. Лучи света очень далеких галактик зримым образом изгибаются, проходя мимо очень массивных областей — гигантских скоплений галактик или отдельной очень большой галактики. Точка света может при этом размазываться, обращаясь в дугу. Поскольку это похоже на действие линзы, эффект так и назвали — гравитационная линза. Если далекая галактика находится прямо за очень тяжелым промежуточным объектом, идущий от нее свет размазывается в совершенный круг, называемый «кольцом Эйнштейна». Множество прекрасных фотографий этого эффектного зрелища получено с помощью космического телескопа «Хаббл».

Сейчас эйнштейновская общая теория относительности широко используется для моделирования вселенной в целом. Пространство-время можно представить себе как ландшафт, в котором есть горы, долины и впадины. До сих пор общая теория

## Гравитационные волны

Еще одна особенность общей теории относительности состоит в том, что по пространственно-временному «листу резины» может распространяться гравитационная волна. Гравитационные волны могут излучаться, в частности, черными дырами и очень плотными и компактными вращающимися звездами наподобие пульсаров. Астрономы уже обнаружили замедление скорости вращения пульсаров и пришли к выводу, что уменьшение их энергии объясняется излучением ими гравитационных волн, однако сами эти волны обнаружены пока не были. Физики строят на Земле и в космосе гигантские детекторы, позволяющие обнаружить качание очень длинных лазерных лучей, создаваемое проходящими мимо гравитационными волнами. Если удастся зарегистрировать гравитационные волны, это станет еще одним торжеством общей теории относительности Эйнштейна.

**И потому нам следует предположить полную физическую эквивалентность гравитационного поля и соответствующего ускорения системы отсчета. Это предположение распространяет принцип относительности на случай равномерно ускоряемой системы отсчета**

**Альберт Эйнштейн, 1907**

относительности выдерживала все экспериментальные проверки. Области вселенной, в которых она проверяется чаще всего, обладают чрезвычайно сильной гравитацией — но иногда и очень слабой.

Черные дыры (см. с. 168) — это очень глубокие ямы в резиновом листе пространства-времени. Они так глубоки и имеют края столь крутые, что в них сваливается все, к ним приближающееся, — даже свет. Это дыры, или сингулярности, пространства-времени. Пространство-время может также искривляться, образуя кротовые норы, или трубки, однако их пока никто своими глазами не видел.

На другом краю «линейки» — там, где гравитация очень слаба, — можно ожидать появления ее крошечных квантов, подобных индивидуальным фотонам, образующим свет. Впрочем, и дискретности гравитации тоже никто пока не наблюдал. Квантовая теория гравитации разработана, однако в отсутствие экспериментальных подтверждений объединение квантовой теории и гравитации остается пока затруднительным. Эйнштейн до конца своей карьеры надеялся осуществить его, но даже ему это так и не удалось, и эта задача до сих пор остается нерешенной.

**В сухом остатке**  
**Искривление**  
**пространства-времени**

# 42 Черные дыры

Упав в черную дыру, вы получили бы впечатления очень неприятные — руки и ноги вам поотрывало бы, а вашим глядящим со стороны знакомым показалось бы, начиная с момента падения, что вы замерли во времени. Поначалу черные звезды представлялись замерзшими звездами, у которых вторая космическая скорость превышает скорость света, однако теперь их рассматривают как дыры, или «сингулярности» в резиновом листе эйнштейновского пространства-времени. И это не просто умозрительные гигантские черные дыры, сидящие в центрах галактик, включая и нашу, но и дыры поменьше — разбросанные по космосу призраки умерших звезд.

Если вы подбросите мяч в воздух, он поднимется на некоторую высоту, а затем упадет вниз. Чем сильнее вы его бросаете, тем выше он взлетает. И если метнуть его с достаточной силой, он преодолит притяжение Земли и вырвется в космос. Скорость, которая для этого требуется, называется «второй космической» и составляет 11 км/с (около 25 000 миль/ч). Ракете, чтобы совсем оторваться от Земли, нужно развить именно эту скорость. Вторая космическая скорость может быть ниже, если вы стоите не на Земле, а на Луне, — там хватит и 2,4 км/с. А вот если вы попадете на планету более массивную, вторая космическая возрастет. Если же эта планета окажется достаточно тяжелой, вторая космическая скорость может достичь скорости света, а то и превзойти

**Бог не только играет в кости, иногда он бросает кости туда, где их и увидеть-то невозможно**

**Стивен Хокинг, 1977**

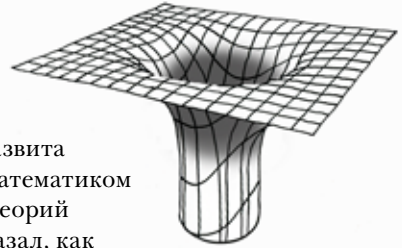
**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1784**

Мичелл приходит к выводу о возможности существования черных звезд

**1930-е**

Предсказывается существование замерзших звезд

таковую — и тогда из-под гравитационного притяжения этой планеты не сможет вырваться даже свет. Такое тело, массивное и плотное настолько, что покинуть его свет не способен, называют «черной дырой».



**Горизонт событий** Идея черной дыры была разработана еще в XVIII столетии геологом Джоном Мичеллом и математиком Пьером-Симоном Лапласом. Затем, после появления теорий относительности Эйнштейна, Карл Шварцшильд показал, как может выглядеть черная дыра. В общей теории относительности пространство и время связаны и ведут себя, как огромный лист резины. Гравитация искривляет лист в соответствии с массой тела. Тяжелая планета покоится в выемке пространства-времени, ее гравитационное притяжение эквивалентно силе, которую вы испытываете, скатываясь в выемку, при этом ваша траектория искривляется, а то и обращается в орбиту спутника планеты.

Так что же такое черная дыра? Яма, настолько глубокая и крутая, что, оказавшись достаточно близко к ней, вы свалитесь в нее и уже не выберетесь наружу; дыра в листе пространства-времени, смахивающая на баскетбольную сетку (правда, мяч из нее достать невозможно).

Если вы минуете черную дыру на большом расстоянии от нее, ваша траектория может изогнуться в ее направлении, но упасть в нее вы все-таки не упадете. Но если вы окажетесь слишком близко к ней, то полетите по спирали, которая приведет вас прямо в нее. Такая участь постигает даже фотон света. Граница между двумя этими исходами называется «горизонтом событий». Все, что пересекает горизонт событий, сваливается в черную дыру — в том числе и свет.

Падение в черную дыру описывают как «спагеттификацию» («растягивание»). Поскольку стены дыры очень круты, в ней имеет место чрезвычайно сильный гравитационный градиент. Если вы упадете в нее ногами вперед, — чего, хочется верить, с вами никогда не случится — они будут втягиваться в дыру с большей силой, чем ваша голова, и вас растянет, точно на дыбе. Добавьте к этому любое вращательное движение, и вы обратитесь в клубок спагетти. Хорошего мало. Некоторые ученые задумывались над тем, как защитить беднягу, который по неосторожности свалится в черную дыру. Один из способов состоит, по-видимому, в том, чтобы надеть на себя спасательный свинцовый пояс. Если он будет достаточно тяжелым и плотным, то сможет противодействовать гравитационному градиенту и сохранить ваше тело и жизнь.

**1965**

Обнаружены квазары

**1967**

Уилер переименовывает «замороженные звезды» в «черные дыры»

**1970-е**

Хокинг описывает испарение черных дыр



## Испарение

Как ни странно это звучит, черные дыры постепенно испаряются. В 1970-х Стивен Хокинг предположил, что черные дыры не черны абсолютно, но излучают частицы, рождающиеся в квантовых явлениях. Так они понемногу теряют массу, и черная дыра сжимается, вплоть до исчезновения. Присущая черной дыре энергия постоянно рождает пары частиц и соответствующих им античастиц. Если это происходит вблизи горизонта событий, одна из частиц может иногда вылетать наружу. Внешний наблюдатель

увидит, как черная дыра испускает частицы, это называется «излучением Хокинга». Такое излучение энергии заставляет черную дыру уменьшаться в размерах. Идея эта остается пока чисто теоретической, никто не знает, что на самом деле случается с черной дырой. Относительно большое их распространение позволяет предполагать, что описанный процесс занимает долгое время, так что от черных дыр мы избавимся еще не скоро.

**Замороженные звезды** Название «черная дыра» было придумано в 1967-м Джоном Уилером в качестве альтернативы другому — «замороженная звезда». Существование замороженных звезд было предсказано в 1930-х теориями Эйнштейна и Шварцшильда. Вследствие причудливого поведения пространства и времени вблизи горизонта событий излучающее вещество, которое пересекает его, кажется замедляющимся, поскольку световым волнам требуется все больше и больше времени, чтобы добраться до наблюдателя этого процесса. При самом пересечении веществом горизонта событий наблюдатель видит, как время попросту останавливается и вещество словно бы вмерзает в пространство. Отсюда и «замороженные звезды», замораживающие, как было предсказано, вещество во время пересечения им горизонта событий. Астрофизик Субраманьян Чандрасекар предсказал, что звезды, масса которых более чем в 1,4 раза превосходит массу Солнца, в конечном счете сжимаются в черную дыру; однако теперь мы знаем, что вследствие принципа исключения Паули (см. с. 120) квантовое давление поддерживает такие звезды в состоянии белых карликов или нейтронных звезд, поэтому для образования черной дыры требуется масса, более чем в три раза превосходящая солнечную. Свидетельства существования замороженных звезд, или черных дыр, удалось обнаружить только в 1960-х.

Если черные дыры всасывают свет, то как же мы можем увидеть их, откуда можем знать, что они существуют и находятся там-то и там-то? Способов два. Во-первых, их можно обнаружить по тому, как они притягивают к себе другие небесные тела.

Во-вторых, газ, который падает в них, разогревается и начинает светиться, перед тем как исчезнуть. Первый метод был использован для обнаружения черной дыры, засевшей в центре нашей собственной Галактики. Астрономы увидели, как пролетавшие мимо центра Галактики звезды выходили затем на вытянутые орбиты, по которым они вращались вокруг этого центра. Центральная черная дыра Млечного Пути обладает массой в миллион солнечных и радиусом примерно в 10 миллионов километров (30 световых секунд). Центральные черные дыры галактик называются «сверхмассивными». Как они образовались, мы не знаем, но, похоже, они воздействуют на рост галактик и потому, возможно, возникли в первый же день их рождения — или выросли из миллиона звезд, сошедшихся в одно место.

Второй способ обнаружения черных дыр сводится к регистрации света, излучаемого газом, который воспламеняется, падая в них. Квазары, самые яркие объекты во вселенной, сияют потому, что газ всасывается в сверхмассивные черные дыры, которые находятся в центрах далеких галактик. Черные дыры поменьше, обладающие всего несколькими солнечными массами, можно обнаружить и по рентгеновским лучам, которые испускает падающий в них газ.

**Кротовые норы** А что находится на дне черной дыры, возникшей в листе пространства-времени? Сходятся ли они на конус и завершаются его острием или и вправду являются дырками, проколами в листе? Теоретики задались таким вопросом: что произойдет, если одна черная дыра соединится с другой? Можно представить себе две соседние черные дыры как длинные трубки, свисающие с пространственно-временного листа. Если они замкнутся друг на друга, образуется одна трубка, или «кротовая нора», соединяющая устья двух черных дыр. Вооружившись «спасательным поясом», вы можете спрыгнуть в одну черную дыру и вылететь из другой. Эта идея множество раз использовалась в научной фантастике для быстрого переноса через пространство и время. Не исключено, что кротовая нора может привести вас в совершенно другую вселенную. Возможности перекраивания вселенной безграничны, но забывать о спасательном поясе все же не следует.

**«Существующие в природе черные дыры — это самые совершенные из макроскопических объектов вселенной: единственными элементами их устройства являются наши концепции пространства и времени»**

**Субраманьян Чандрасекар, 1983**

**В сухом остатке**  
**Ловушки для света**

# 43 Парадокс Ольберса

**Почему небо ночами темное? Если вселенная бесконечна и существовала всегда, она должна быть такой же яркой, как Солнце, — так нет, даром что, глядя в ночное небо, вы видите всю историю вселенной. Число звезд на небе ограничено, а из этого следует, что вселенная имеет конечные размеры и конечный возраст. Парадокс Ольберса указал путь современной космологии и привел к созданию модели Большого взрыва.**

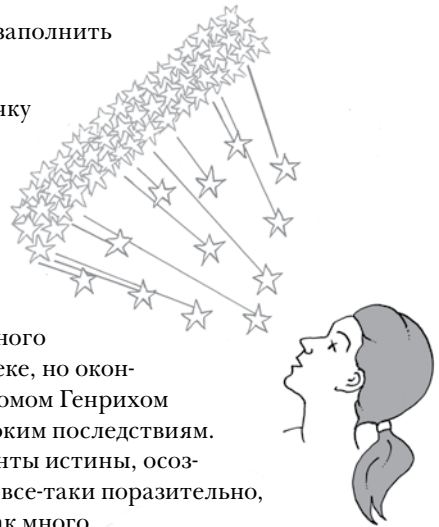
Вы, наверное, думаете, что создание карты всей вселенной и проникновение в ее историю дело сложное, требующее запуска в космос дорогостоящих спутников, строительства огромных телескопов на удаленных горных вершинах и мозгов, как у Эйнштейна. На самом деле, выйдя из дома в ясную ночь, вы можете произвести наблюдение такое же во всех его частностях глубокое, как общая теория относительности. Ночью небо темное. Мы привыкли считать, что это само собой разумеется, однако то, что оно темное, а не сверкает, как Солнце, говорит нам о нашей вселенной очень многое.

**Гори, гори, моя звезда** Если бы вселенная была бесконечно велика и бесконечно уходила от нас во всех направлениях, то куда бы мы ни посмотрели, непременно увидели бы звезду. Каждый наш взгляд упирался бы в звезду. А по мере нашего удаления от Земли пространство наполнялось бы все большим и большим числом звезд. Это как в лесу: вблизи от себя вы различаете отдельные стволы, и чем они ближе, тем более крупными кажутся, но все поле вашего зрения заполняют деревья все более и более удаленные. И если лес достаточно велик, вы не сможете различить лежащего за ним ландшафта. То же самое происходило бы, будь вселенная бесконечно большой. Разумеется, расстояния между звездами больше, чем между деревьями,

но в конечном счете их было бы достаточно, чтобы заполнить собой все небо.

Если бы все звезды походили на Солнце, каждую точку неба заполнял бы их свет. Даже если отдельная далекая звезда светится слабо, есть и другие, расположенные на небосводе вплотную к ней. И если сложить свет всех звезд, его получилось бы столько же, сколько дает Солнце, а все ночное небо сияло бы так же ярко, как оно.

Но видно же, что это не так. Парадокс темноты ночного неба был отмечен Иоганном Кеплером еще в XVII веке, но окончательно сформулирован в 1823-м немецким астрономом Генрихом Ольберсом. Разрешение парадокса приводит к глубоким последствиям. Их существует несколько, и каждое содержит элементы истины, осознанной и принятой современными астрономами. И все-таки поразительно, что столь простое наблюдение может сказать нам так много.



## Тьма небесная

Из-за свечения наших городов увидеть темной ночью красоту ночного неба становится все труднее. На протяжении всей истории человечества люди могли смотреть ясными ночами в небо и видеть раскинувшийся по нему звездный становой хребет. Его назвали Млечным Путем, а теперь мы, глядя на него, понимаем, что перед нами — центральная плоскость нашей Галактики. Пятьдесят лет назад даже в больших городах можно было полюбоваться и Млечным Путем, и самыми яркими звездами, но теперь их из городов почти

не увидишь, да и за городом небо купается в желтоватой дымке. Картина, вдохновлявшая до нас многие поколения, становится неразличимой. И главные виновники этого — натриевые уличные фонари, в особенности те, что попусту расходуют свет, отбрасывая его не только вниз, но и вверх. По всему миру возникают объединения людей наподобие Международной ассоциации темного неба (в состав которой входят и астрономы), выступающих за то, чтобы обуздать световое загрязнение и сохранить за нами возможность видеть вселенную.

**1832**

Ольберс формулирует парадокс, получивший его имя

**1912**

Весто Слайфер измеряет красное смещение галактик

## Эврика!

В 1848 году Эдгар Аллан По написал поэму в прозе «Эврика», в которой говорится:

*«Если бы непрерывность звезд была бесконечна, тогда бы заднее поле неба являло нам единообразную светимость, подобную исходящей от Млечного Пути, — ибо безусловно не было бы точки, на всем этом заднем поле, где не существовало бы звезды. Единственный способ поэтому, при таком положении вещей, понять пустоты, что открывают наши телескопы в бесчисленных направлениях, предположить, что рассеяние от незримого заднего поля так несметно, что ни один его луч доселе совершенно не мог нас достигнуть»\*.*

\* Перевод  
К. Бальмонта.

**Конец и край** Первое объяснение выглядит так: вселенная не бесконечна. Где-то у нее есть край. И значит, число звезд в ней ограничено и далеко не каждая линия зрения должна упираться в звезду. Точно так же, стоя у опушки леса или просто в маленькой рощице, можно видеть то, что лежит за ней.

Другое объяснение может состоять в том, что чем дальше от нас, тем меньше становится звезд, поэтому суммарный их свет не так уж и ярок. Свет распространяется с конечной скоростью, стало быть, от далеких звезд он идет к нам дольше, чем от близких. Свет Солнца доходит до нас за 8 минут, свет ближайшей к нам звезды Альфы Центавра — за 4 года, а свет звезд, находящихся на другой стороне нашей Галактики, — за 100 тысяч лет. Свет же ближайшей к нам галактики, Андромеды, добирается до нас 2 миллиона лет; это самый далекий объект, какой мы можем разглядеть невооруженным глазом. Чем дальше проникаем мы взглядом во вселенную, тем более раннее время видим, и далекие звезды выглядят более молодыми, чем те, что близки к нам. А если далеких юных звезд становится меньше, чем близких, подобных Солнцу, это помогает разрешить парадокс Ольберса. Звезды вроде Солнца живут 10 миллиардов лет (у тех, что размером больше, жизнь короче, у тех, что меньше, длиннее), поэтому конечность существования звезд также объясняет парадокс. Если уйти еще дальше молодых звезд, свету придется проходить еще большие и мы окажемся во времени, когда звезд и вовсе не было. Они же не вечны.

Далекие звезды могут светиться слабее, чем Солнце, еще и по причине красного смещения. Расширение вселенной растягивает световые волны, отчего свет далеких звезд представляется более красным. Поэтому далекие звезды кажутся нам более холодными, чем близкие. А это также ограничивает количество света, доходящего до нас от окраинных частей вселенной.

Выдвигались идеи и совсем дикие, например: свет дальних звезд блокируется мусором, оставленным в космосе другими цивилизациями, — ну там железными опилками или какой-нибудь серой пылью. Однако любой поглощенный свет всегда испускается в виде тепла, а значит, в какой-то части спектра он все равно должен присутствовать. Астрономы просмотрели свет ночного неба на всех длинах волн, от радиоволн до гамма-лучей, и никаких свидетельств блокирования света видимых звезд не обнаружили.

**Середина вселенского пути** Итак, простое наблюдение, что ночью небо темное, говорит нам о том, что вселенная не бесконечна. Она просуществовала ограниченное количество времени, она ограничена в размерах, а звезды ее не вечны.

На этом и основана современная космология. Возраст самых старых из наблюдаемых нами звезд составляет около 13 миллиардов лет, из чего мы делаем вывод, что вселенная должна была образоваться за какое-то время до этого срока. Парадокс Ольберса подсказывает, что время это было не велико, иначе мы видели бы многие предыдущие поколения звезд, а мы их не видим.

Свет звезд в далеких галактиках действительно краснее света звезд ближних — это и затрудняет их нахождение с помощью оптических телескопов, и подтверждает расширение вселенной. Самые далекие из известных сейчас галактик красны настолько, что уже и невидимы, их можно обнаружить лишь в инфракрасной части спектра. Все это говорит в пользу идеи Большого взрыва, с которого 14 миллиардов лет назад началась вселенная.

В сухом остатке  
Наша конечная  
вселенная



# 44 Закон Хаббла

Эдвин Хаббл первым понял, что все окружающие нас галактики удаляются от нашей. И чем они дальше, тем быстрее удаляются — следуя закону Хаббла. Так галактическая диаспора дала нам первое свидетельство расширения вселенной — поразительное открытие, изменившее все наши представления о ней и ее дальнейшей судьбе.

Вывод о том, что Земля вращается вокруг Солнца, сделанный Коперником в XVI веке, перепугал многих. Оказывается, человечество вовсе не обитает в центре космоса. Однако результат телескопических измерений, проведенных в 1920-х американским астрономом Эдвином Хабблом, оказался еще более неутешительным. Хаббл показал, что вселенная не статична, что она расширяется. Он свел в таблицу расстояния от нашей Галактики до других и их скорости относительно Млечного Пути и обнаружил, что галактики удаляются от нас.

**История астрономии — это история расширяющихся горизонтов**

**Эдвин Хаббл, 1938**

Оказывается, мы столь непопулярны в космосе, что в нашу сторону медленно продвигаются лишь несколько ближайших соседей. Чем дальше от нас галактика, тем быстрее она удаляется — скорость ее пропорциональна расстоянию между нами (закон Хаббла). Отношение между скоростью и расстоянием всегда одно и то же, его назвали «постоянной Хаббла». Сегодняшние астрономы измерили эту величину, она оказалась близкой к 75 километрам в секунду на мегапарсек (мегапарсек, или миллион парсеков, равен 3 262 000 световых лет, или  $3 \times 10^{22}$  м). Вот с такой скоростью галактики от нас и удаляются.

**Большие дебаты** До XX столетия астрономы и в собственной-то Галактике, в Млечном Пути, мало что понимали. Они провели измерения для сотен ее звезд и заметили также немало легких размытостей,

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

1918

Весто Слайфер измеряет красное смещение туманности

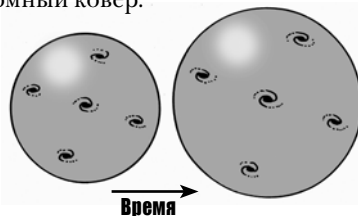
1920

Шепли и Кёртис заводят спор о размерах Млечного Пути

названных «туманностями». Некоторые из них были газовыми облаками, имевшими отношение к рождениям и смертям звезд. Но были и другие, обладавшие спиральной или овальной формой, наводившей на мысль, что устроены они сложнее обычного облака.

В 1920 году два знаменитых астронома заспорили о происхождении этих размытостей. Харлоу Шепли доказывал: все, что мы видим в небе, составляет часть Млечного Пути, который, собственно, и есть вселенная. Напротив, Гебер Кёртис полагал, что некоторые из этих туманностей представляют собой «островные вселенные» — «вселенные» внешние по отношению к Млечному Пути. Термин «галактика» был введен уже впоследствии, и как раз для описания этих туманностей, они же вселенные. Каждый астроном приводил доводы в поддержку своей идеи, так что за один день их спор не закончился. Более поздняя работа Хаббла показала, что прав был Кёртис. Спиральные туманности оказались внешними галактиками, которые лежат за пределами Млечного Пути. Вселенная вдруг развернулась, как огромный ковер.

**Разлет** Хаббл использовал 100-дюймовый телескоп обсерватории Маунт-Вилсон для измерений светимости пульсирующих звезд туманности Андромеды, являющейся, как теперь известно, спиральной галактикой, очень похожей на Млечный Путь и на другие галактики, родственные нашей. Эти переменные звезды называются «цефеидами» — по первой из них, открытой в созвездии Цефея, — они и сейчас остаются незаменимыми для выяснения расстояний. У таких звезд светимость и период ее изменения связаны с яркостью, поэтому если вы знаете, как меняется светимость цефеиды, то знаете и какова ее яркость. А зная яркость, можно выяснить, насколько далека от нас эта звезда, потому что с ростом расстояния она тускнеет. Тут все просто: вы видите вдали электрическую лампочку и знаете, что ее мощность составляет 100 Вт, — тогда вам ничего не стоит определить расстояние до нее, сравнив ее яркость с яркостью такой же лампочки, горящей прямо перед вами.



Именно так Хаббл и измерил расстояние от нас до галактики Андромеды. Оно оказалось намного больше установленных Шепли размеров нашего Млечного Пути, а значит, эта галактика должна лежать за его пределами. Это простое наблюдение породило революцию. Оно означало, что вселенная огромна и наполнена другими галактиками, очень похожими на Млечный Путь. Если изгнание Солнца из центра вселенной рассердило Церковь и обидело чувства человечества, то разжалование Млечного Пути в рядовые огромного воинства, состоящего из миллионов других галактик, нанесло человеческому самолюбию удар еще более сильный.

**1922**

Александр Фридман публикует модель Большого взрыва

**1924**

Происходит открытие переменных звезд — цефеид

**1929**

Хаббл и Милтон Хьюмасон открывают закон Хаббла

## Космический телескоп «Хаббл»

Космический телескоп «Хаббл» — это безусловно самая популярная из всех орбитальных обсерваторий. Сделанные им изумительные фотографии туманностей, далеких галактик и окружающих звезды дисков в течение двадцати лет украшали первые страницы многих газет. Запущенный в 1990 году с борта шаттла «Дискавери», этот космический корабль близок по размерам к двухэтажному автобусу — 13 м в длину, 4 м в ширину, 11 000 кг веса. Он несет на себе астрономический телескоп с зеркалом в 2,4 м и комплект фотокамер и электронных детекторов, способных давать кристально

чистые изображения, получаемые в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасных частях спектра. Сила «Хаббла» состоит в том, что он находится вне атмосферы Земли, поэтому сделанные им фотографии не размазываются. Ныне «Хаббл» состарился и дальнейшая его судьба стала неопределенной. НАСА может модернизировать его инструментарий, но для этого потребуется послать к нему шаттл с командой космонавтов, — а может, и прекратить работу с ним, оставив его вечно вращаться вокруг Земли либо утопив в океане.

**«Мы видим, как они уменьшаются и тускнеют во все большем числе, и знаем, что заглядываем в пространство все дальше и дальше и будем заглядывать, пока самая тусклая из туманностей, обнаруженная с помощью самого мощного телескопа, не скажет нам, что мы добрались до границы известной вселенной»**

**Эрвин Хаббл, 1938**

Следом Хаббл занялся составлением таблицы расстояний от нас до других галактик. Он обнаружил также, что идущий от них свет претерпевает пропорциональное расстоянию красное смещение, подобное доплеровскому, наблюдаемому длядвигающихся с большой скоростью объектов (см. с. 76). То, что все частоты, например частоты атомных переходов водорода, были «краснее», чем ожидалось, означало: все галактики уносятся от нас, как множество машин «скорой помощи», у которых при этом понижается тон сирены. Странно, вообще говоря, что все они стараются оказаться от нас подальше и лишь несколько «локальных» движутся в нашу сторону. И чем дальше вы заглянете, тем большей будет скорость разлета. Хаббл понял, что галактики не просто удаляются *от нас* — это обеспечило бы нам во вселенной место слишком привилегированное, — нет, все они разлетаются и друг

от друга. И пришел к выводу, что сама вселенная расширяется, увеличиваясь в размерах, как гигантский надуваемый воздушный шарик. Галактики подобны точкам на его поверхности: чем больше воздуха накачивается в шарик, тем дальше они уходят друг от друга.

**Как далеко, как быстро?** Даже сегодняшние астрономы используют переменные звезды, цефеиды, для того чтобы оценить скорость расширения нашей локальной вселенной. Главная их цель — точное измерение постоянной Хаббла. А для этого нужно знать расстояние до какого-либо объекта и величину его скорости, или красного смещения. Красное смещение несложно измерить по атомным спектрам. Частоту определенного атомного перехода в свете звезды можно сравнить с нею же, но полученной в лаборатории, разница между ними и даст величину красного смещения. Расстояния определять труднее, поскольку для этого необходимо наблюдать за некоторым небесным телом, для которого известна его длина или истинная яркость, «стандартная свеча».

Способов определения астрономических расстояний существует немало. Способ цефеид хорошо работает для ближних галактик, в которых еще можно различить индивидуальные звезды. Однако на расстояниях много больших необходимы другие методы. Они существуют, и все их можно объединить, соорудив гигантскую измерительную линейку, или «шкалу расстояний». Однако, поскольку каждый метод имеет свои особенности, точность этой расширенной шкалы все еще оставляет желать лучшего.

Ныне постоянная Хаббла известна с точностью около 10%, за что следует благодарить главным образом наблюдения за галактиками и космическим микроволновым фоновым излучением, проведенные космическим телескопом «Хаббл». Расширение вселенной началось с породившего ее Большого взрыва — вот с тех пор галактики и разлетаются. Закон Хаббла позволяет установить предельный возраст вселенной. Поскольку она постоянно расширяется, можно проследить этот процесс вспять, к начальной точке. Получается 14 миллиардов лет. По счастью, скорости расширения не достаточно для того, чтобы порвать вселенную на куски. На самом-то деле космос точно сбалансирован, полностью разорваться он не может и содержит массу достаточную, чтобы со временем начать сжиматься в точку.

**В сухом остатке**  
**Расширяющаяся**  
**вселенная**

# 45 Большой взрыв

**Рождение вселенной в феноменальном взрыве создало все пространство, материю и время, какие нам известны. Сам этот взрыв предсказан математикой общей теории относительности, мы же видим свидетельства того, что он действительно произошел, в разбегании галактик, количестве легких элементов во вселенной и наполняющем небо микроволновом свечении.**

Вселенная родилась в Большом взрыве. Сегодня, оглядываясь вокруг, мы видим знаки того, что наша вселенная расширяется, и заключаем, что в прошлом она была и меньше, и горячее. Из чего логически вытекает, что весь космос мог родиться в одной точке. В миг воспламенения образовался огненный шар, в котором возникли пространство, время и материя. Постепенно, за 14 миллиардов лет, это горячее, плотное облако раздулось и остыло, а со временем и фрагментировалось, породив звезды и галактики.

\* Английское «*big bang*» можно перевести как «большой бабах».

**Это не шуточка** На самом деле фраза «большой взрыв» была придумана в насмешку\*. Выдающемуся британскому астроному Фреду Хойлу представлялась нелепой идея, что вся вселенная могла вырасти из одного семечка. В серии лекций, впервые прочитанных им по радио в 1949 году, он высмеивал как притянутое за уши соответствующее предположение бельгийского математика Жоржа Леметра, нашедшего именно такое решение уравнений общей теории относительности. Хойл предпочитал верить, что космос сбалансирован. Вечно находящейся в «устойчивом состоянии» вселенной Хойла материя и пространство непрерывно создаются и уничтожаются, что позволяет ей существовать в течение неограниченного времени. Однако данные продолжали накапливаться, и к 1960-м от статичной картины Хойла пришлось отказаться под весом свидетельств, говоривших в пользу Большого взрыва.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

### 1927

Фридман и Леметр создают теорию Большого взрыва

### 1929

Хаббл обнаруживает расширение вселенной

**Расширяющаяся вселенная** Успех модели Большого взрыва зиждется на трех важнейших наблюдениях. Первое было сделано в 1920-х Эдвином Хабблом и состояло в том, что большинство галактик улетает от нашей. Издали видно, что улетают они и одна от другой, как будто ткань пространства-времени расширяется, растягивается, следуя закону Хаббла. Вследствие этого растягивания свету, пересекающему расширяющуюся вселенную, требуется немного больше времени, чем в случае, когда все расстояния фиксированы. Этот эффект регистрируется как сдвиг частоты света, названный «красным смещением», поскольку приходящий к нам свет «краснее», чем он был, когда покидал далекую звезду или галактику. Красные смещения можно использовать для определения астрономических расстояний.

**Легкие элементы** Если мы вернемся назад во времени, к первым после Большого взрыва часам жизни новорожденной вселенной, то увидим, что все в ней плотно упаковано и кипит, как в перегретой кастрюле. В первую секунду вселенная была так горяча, что и атомы ее стабильностью не отличались. По мере того как она разрасталась и остывала, возник суп из кварков, глюонов и других элементарных частиц (см. с. 144). По прошествии всего одной минуты кварки слиплись в протоны и нейтроны. Затем, в течение трех минут, космическая химия смешала в разных пропорциях протоны и нейтроны, создав атомные ядра. Вот тогда посредством слияния ядер и образовались первые отличные от водорода элементы. А после того как температура вселенной упала ниже предельной температуры слияния, создание элементов более тяжелых, чем бериллий, стало невозможным. Таким образом, изначально вселенная была затоплена возникшими при Большом взрыве ядрами водорода, гелия, остатков дейтерия (тяжелого водорода), лития и бериллия.

В 1940-х Ральф Альфер и Георгий Гамов предсказали пропорции созданных во время Большого взрыва легких элементов, и эта базовая картина подтверждается даже самыми недавними измерениями, проведенными для медленно тлеющих звезд и первозданных газовых облаков нашего Млечного Пути.

**ПереклЮчите телевизор на канал, по которому ничего не передается, — примерно 1% пляшущих на его экране статических помех обязан своим происхождением древним остаткам Большого взрыва. И когда в следующий раз начнете жаловаться, что вам ничего не показывают, вспомните, что зато вы всегда можете понаблюдать за рождением вселенной**

Билл Брайсон, 2005

**1948**

Предсказывается существование микроволнового фонового излучения. Альфер и Гамов производят расчеты ядерного синтеза Большого взрыва

**1949**

Хойл придумывает термин «Большой взрыв»

**1965**

Пензиас и Вильсон регистрируют микроволновое фоновое излучение

**1992**

Спутник COBE измеряет неоднородности космического микроволнового фонового излучения



## Расписание Большого взрыва

Время

**13,7 миллиарда лет** [после Большого взрыва]

Сейчас (температура  $T = 2,726 \text{ K}$ )

**200 миллионов лет** «Реионизация»:

первые звезды нагревают и ионизируют газообразный водород ( $T = 50 \text{ K}$ )

**380 тысяч лет** «Восстановление»:

газообразный водород остывает до способности образовывать молекулы ( $T = 3000 \text{ K}$ )

**10 тысяч лет** Завершается эра

преобладания излучения ( $T = 12000 \text{ K}$ )

**1000 секунд** Распад одиноких нейтронов

( $T = 500$  миллионов  $\text{K}$ )

**180 секунд** «Ядерный синтез»:

из водорода образуются гелий и другие элементы ( $T = 1$  миллиард  $\text{K}$ )

**10 секунд** Аннигиляция электрон-

позитронных пар ( $T = 5$  миллиардов  $\text{K}$ )

**1 секунда** Выделение нейтрино

( $T \sim 10$  миллиардов  $\text{K}$ )

**100 микросекунд** Аннигиляция пионов

( $T \sim 1$  триллиона  $\text{K}$ )

**50 микросекунд** «Фазовый переход КХД»:

кварки связываются в нейтроны и протоны ( $T = 2$  триллиона  $\text{K}$ )

**10 пикосекунд** «Фазовый переход

электрослабого взаимодействия»: возникает различие между электромагнитным и слабым взаимодействиями ( $T \sim 1\text{--}2$  квадрильонов  $\text{K}$ )

До этого времени температуры настолько высоки, что наши физические представления утрачивают определенность.

**Большой взрыв**

## Микроволновое свечение

Еще одна опора модели Большого взрыва была обнаружена в 1965-м. Арно Пензиас и Роберт Вильсон работали в «Белл Лабс» над моделью радиоприемника и были озадачены слабым шумовым сигналом, от которого никак не удавалось избавиться. Казалось, все небо обратилось в источник микроволн, имеющий температуру в несколько градусов Кельвина.

Переговорив с астрофизиком Робертом Дикке из соседнего Принстонского университета, они поняли, что сигнал этот соответствует предсказанному послесвечению Большого взрыва. Они случайно наткнулись на космическое микроволновое фоновое излучение, море фотонов, оставшихся от юной вселенной. Дикке, как раз и занимавшийся созданием антенны, которая позволила бы принимать фоновое излучение, их радости не разделял: «Ребята нас обскакали», — жаловался он.

В теории Большого взрыва существование микроволнового фонового излучения было предсказано в 1948 году Георгием Гамовым, Ральфом Альфером и Робертом Германом. Хотя ядра были синтезированы в первые три минуты, образования атомов пришлось дожидаться еще 400 000 лет. Со временем отрицательно заряженные электроны соединились с положительно заряженными ядрами и появились атомы водорода и других легких элементов. Туман из заряженных частиц, мешавший

прохождению света, рассеялся, вселенная стала прозрачной. И с этого времени свет мог свободно распространяться, что и позволяет нам заглядывать в далекое прошлое.

Хотя туман, заполнявший молодую вселенную, был поначалу горячим (около 3000 К), расширение вселенной сместило его свечение в красную сторону, и сейчас мы наблюдаем это свечение с температурой меньше 3 К (на три градуса выше абсолютного нуля). Вот его и обнаружили Пензиас с Вильсоном. Три опорных столпа теории Большого взрыва до сих пор остаются незыблемыми, хотя горстка астрофизиков еще продолжает цепляться за стационарную модель, но объяснить все три названных явления пока способна только теория Большого взрыва и никакая другая.

**Судьба и прошлое** А что происходило до Большого взрыва? Поскольку именно в нем и было создано пространство-время, вопрос этот не вполне осмысленный — что-то вроде «где начинается Земля?» или «что находится севернее Северного полюса?». Тем не менее математическая физика пытается понять, что привело к Большому взрыву, используя для этого многомерное (как правило, 11-мерное) пространство в духе М-теории и теории струн. В попытках найти первопричину этого события рассматриваются физика и энергия струн и мембран в таких многомерных пространствах с привлечением идей физики элементарных частиц и квантовой механики. Используя аналогии с определенными идеями квантовой физики, некоторые космологи обсуждают существование параллельных вселенных.

В модели Большого взрыва — в отличие от стационарной модели — вселенная эволюционирует. Судьба космоса определяется балансом между гравитационным притяжением и физическими силами, стремящимися разорвать его. Если победит гравитация, расширение вселенной рано или поздно остановится, она начнет сжиматься и в конце концов воспроизведет Большой взрыв задом наперед — получится «большая давка». Вселенная может пережить множество таких циклов рождения-смерти. Альтернативно, если победят силы отталкивания (такие как темная энергия), они со временем разорвут все звезды, планеты и галактики и наша вселенная обратится в темную пустыню черных дыр и частиц — «большой холод». И наконец, существует еще возможность «вселенной тонкой настройки», в которой силы притяжения и силы отталкивания уравновешены, — она продолжает расширяться вечно, но постепенно замедляясь. Именно этот вариант считает наиболее вероятным современная космология. Вселенная устроена правильно.

«**Вселенная построена в соответствии с единым связным планом, хотя я и не знаю — с каким**»

**Фред Хойл, 1915–2001**

**В сухом остатке  
Взрыв всему голова**

# 46 Космическая инфляция

**Почему вселенная выглядит одинаково во всех направлениях? И почему, когда параллельные лучи света пересекают пространство, они остаются параллельными, что позволяет нам видеть отдельные звезды? Мы полагаем, что ответом на эти вопросы является слово «инфляция», — новорожденная вселенная так быстро вздувается за какую-то долю секунды, что все ее «складки» разглаживаются, а дальнейшее расширение уравнивается силами притяжения.**

Вселенная, в которой мы живем, — это особый случай. Вглядываясь в нее, мы ясно видим скопления звезд и далекие галактики, причем видим без искажений. А ведь все могло быть иначе. Общая теория относительности Эйнштейна описывает гравитацию как искривление листа пространства-времени, вследствие которого лучи света движутся по изогнутым линиям (см. с. 164). Стало быть, потенциально лучи света

**Принято говорить, что бесплатных завтраков не бывает. Однако вселенная — это самый что ни на есть бесплатный завтрак ?**

могли бы и перепутаться, и тогда мы увидели бы вселенную искаженной, как отражение в кривом зеркале. Но, в общем и целом, если не считать легкого отклонения при пересечении Галактики, лучи света проходят вселенную по линиям более-менее прямым. И мы ясно видим ее до самого края.

**Алан Гут, р. 1947**

**Плоскостность** Несмотря на то что теория относительности представляет пространство-время как искривленную поверхность, астрономы иногда описывают вселенную как «плоскую» — в том смысле, что параллельные лучи света, сколь бы далеко ни уходили они в космос, так и остаются параллельными, как если бы они двигались по плоской равнине.

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1981**

Гут выдвигает идею инфляции

**1992**

Спутник COBE обнаруживает горячие и холодные пятна и измеряет их температуры

## Геометрия вселенной

Самые последние измерения микроволнового фона, произведенные в 2003-м и 2006-м спутником WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* — зонд микроволновой анизотропии Уилкинсона), позволили физикам установить форму, которую пространство-время имеет на протяжении всей вселенной. Сравнивая размеры горячих и холодных участков микроволнового неба с величинами, предсказанными теорией Большого взрыва, они показали, что вселенная является «плоской». Даже пересекая всю ее, на что уходят миллиарды лет, параллельные лучи света так параллельными и остаются.

Пространство-время можно представить себе как резиновый лист, в котором тяжелые тела оставляют вмятины, изображающие гравитацию. На самом-то деле размерностей у пространства-времени больше (по меньшей мере четыре: три пространственных и одна временная), но это трудно себе представить. Кроме того, эта ткань постоянно расширяется, как оно повелось со времени Большого взрыва. Геометрия вселенной такова, что лист остается по преимуществу плоским, как столешница, если не считать мелких ямок и вмятинок, создаваемых скоплениями материи. И потому свет распространяется по вселенной практически беспрепятственно, лишь кое-где огибая массивные тела.

Если бы материи было слишком много, она продавливала бы пространственно-временной лист, и в конце концов он схлопнулся бы, сменив расширение на сжатие. В этом случае изначально параллельные лучи света со временем сходились в одну точку. Будь материи маловато, пространственно-временной лист, расширяясь, порвался бы. Параллельные световые лучи разбежались бы. Однако наша вселенная избрала, похоже, золотую середину: материи в ней как раз достаточно, чтобы сохранять пространственно-временной лист целым, позволяя ему неуклонно расширяться. То есть вселенная выглядит точно уравновешенной (см. вставку).

**Единообразие** Еще одна особенность вселенной состоит в том, что она выглядит примерно одинаковой во всех направлениях. Галактики не скапливаются в каком-то одном месте, но рассеяны там и сям вокруг нас. На первый взгляд тут нет ничего удивительного, и тем не менее это свойство вселенной является неожиданным. Загвоздка состоит в следующем: вселенная так велика, что противоположные ее

### 2003

Спутник WMAP составляет карту космического микроволнового фонового излучения

## Микроволновой фон

Все эти проблемы разрешаются наблюдением космического микроволнового фонового излучения. Этот фон — остатки послесвечения огненного шара, который возник при Большом взрыве и ныне претерпел красное смещение к температуре 2,73 К. Такова она по всему небу, если не считать горячих и холодных пятен, чья температура отличается от 2,73 К на одну сотысячную. Вообще говоря, такая однородность представляется странной, поскольку, когда вселенная была совсем молодой, удаленные части ее не могли сообщаться друг с другом даже на световой скорости. И тем не менее все они имеют в точности одну и ту же температуру. А крошечные вариации ее — это «ископаемые» остатки квантовых флуктуаций юной вселенной.

края не могут сообщаться друг с другом даже на скорости света. Просуществовавшая всего 14 миллиардов лет, она имеет в поперечнике *больше* 14 миллиардов световых лет. В результате свету, хоть он и распространяется с максимальной скоростью, с какой только может перемещаться любой испущенный сигнал, просто не хватает времени, чтобы добраться от одного края вселенной до другого. Так откуда же один край знает, на что похож другой? Это так называемая «проблема горизонта», где под «горизонтом» понимается максимальное расстояние до поверхности световой сферы. То есть в пространстве существуют области, которых мы видеть не можем и никогда не увидим, поскольку исходящему из них свету не хватит времени, чтобы добраться до нас.

**Гладкость** Помимо прочего, вселенная отличается «гладкостью». Галактики рассеяны по небу вполне однородно. Если вы, глядя на них, прищуритесь, то увидите ровное свечение, а не несколько больших пятен. И это опять-таки требует объяснений. Галактики образовались с течением времени благодаря гравитации. В начале был сверхплотный участок в газе, оставшемся от Большого взрыва. Благодаря гравитации этот участок начал сжиматься, формируя звезды, из которых затем сложились галактики. Изначальные сверхплотные «семена» галактик возникли благодаря квантовым эффектам, крошечным сдвигам в энергии частиц горячей зародышевой вселенной. Но ведь они вполне могли разрастись до больших скоплений галактик, а не обратиться в их широко раскинувшееся море,





которое мы наблюдаем. Распределение галактик смахивает скорее на множество кротовых кочек, чем на гигантские горные кряжи.

**Скачок роста** Проблемы плоскостности, горизонта и гладкости вселенной разрешаются с помощью одной идеи: инфляции.

Инфляционная модель была разработана в 1981 году американским физиком Аланом Гутом. Проблема горизонта — то, что вселенная выглядит одинаковой во всех направлениях, даже при том, что она слишком велика, чтобы «знать» об этом, — подразумевает, что когда-то вселенная была настолько мала, что свет мог проходить ее из конца в конец. А поскольку теперь это уже не так, она должна была быстро разрастись до пропорционально большей вселенной, которую мы наблюдаем ныне. И происходить эта «инфляция» должна была стремительно, со скоростью, большей скорости света. За какую-то долю секунды вселенная удвоилась в размерах, и удвоилась еще, и еще, разгладив легкие колебания плотности, оставленные квантовыми флуктуациями, — примерно так же, как картинка, напечатанная на поверхности воздушного шарика, бледнеет, когда его надувают. Так вселенная и стала гладкой. Кроме того, инфляционный процесс зафиксировал последующий баланс между гравитацией и дальнейшим расширением, приобретшим скорость гораздо меньшую. Произошло это почти сразу после Большого взрыва (через  $10^{-35}$  секунд).

Доказательств того, что так все и было, пока не имеется, да и побудительная причина инфляции толком еще не понята — моделей ее существует примерно столько же, сколько теоретиков, — однако имеется понимание того, что на достижение этой цели будет сориентировано следующее поколение космологических экспериментов, в том числе и создание более подробной карты космического микроволнового фонового излучения и его поляризации.

**Картина получается фантастическая: законы физики показывают, как все сущее возникло из ничего в результате случайной квантовой флуктуации, а в последующие 15 миллиардов лет материя смогла организовать столь сложным образом, что теперь мы, люди, сидим здесь, беседуем и вообще что хотим, то и делаем**

Алан Гут, р. 1947

## В сухом остатке Космический скачок роста



# 47 Темная материя

Девяносто процентов материи во вселенной не светится, она темная. Темную материю можно обнаружить по ее гравитационному воздействию, но со световыми волнами или остальной материей она не взаимодействует. Ученые считают, что темная материя может принимать либо форму МАСНО (массивных компактных объектов галактических гало), то есть несостоявшихся звезд и газовых облаков, либо WIMПов (слабо взаимодействующих массивных частиц) — экзотических элементарных частиц. Поиск темной материи — сейчас передовой край физики.

Слова «темная материя» звучат экзотично, и, может быть, такова она и есть, однако определение это вполне приземленное. Большая часть того, что мы наблюдаем во вселенной, светится, потому что излучает или отражает свет. Звезды помигивают, испуская фотоны, планеты сияют, отражая свет Солнца. Без этого света мы бы их просто не увидели. Луна, входя в тень Земли, становится темной; звезды, выгорая, оставляют угли, почти невидимые; даже такая большая планета, как Юпитер, стала бы невидимкой, если бы ушла подальше от Солнца. Так что на первый взгляд нет, пожалуй, ничего удивительного в том, что значительная часть вещества вселенной не светится. Это и есть темная материя.

**Темная сторона** Хотя наблюдать темную материю непосредственно мы не можем, нам удастся обнаружить ее массу по гравитационному притяжению к ней других астрономических тел и лучей света. Если бы мы не знали, что Луна вращается вокруг Земли, то все же могли бы обнаружить ее присутствие по тому, как она притягивает Землю и слегка смещает ее орбиту. Мы сумели использовать гравита-

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**

**1933**

Цвикки измеряет массу темной материи в галактическом скоплении Комо

## Энергетический бюджет

В настоящее время мы знаем, что лишь около 4% материи вселенной образовано барионами (обычной материей, состоящей из фотонов и нейтронов). Еще 23% — это экзотическая темная материя. Нам известно, что барионов в ней нет. Труднее сказать, что в ней есть, но это могут быть такие частицы, как WIMPy. За оставшуюся часть энергетического бюджета вселенной полностью отвечает еще одна сущность — темная энергия.

цию даже для того, чтобы обнаружить вращающиеся вокруг далеких звезд планеты, — их притяжение создает легкое дрожание материнских звезд.

В 1930-х швейцарский астроном Фриц Цвикки обнаружил, что соседнее с нами гигантское скопление галактик ведет себя так, точно его масса намного больше веса всех звезд всех входящих в него галактик. Из этого он сделал вывод о существовании некоей темной материи, масса которой в 400 раз превышает массу материи светящейся — звезд и горячего газа. Само количество темной материи стало большим сюрпризом, ибо подразумевало, что вселенная по большей части состоит не из звезд и газа, но чего-то другого. Так что же оно собой представляет, это темное «другое»? И где прячется?

Массы недостает и в отдельных спиральных галактиках. Газ в их внешних областях вращается быстрее, чем следовало бы, будь масса галактики равной суммарной массе всех ее звезд. То есть такие галактики массивнее, чем позволяет заключить одно лишь их излучение. И в этом случае дополнительной темной материи следует быть в сотни раз тяжелее, чем все видимые звезды и газ. Темная материя не только распределена по всем галактикам, масса ее так велика, что определяет движение каждой звезды. Она распространяется даже за пределы галактик, заполняя сферическое «гало», или пузырек, в который заключен каждый плоский диск спиральной галактики.

**Прибавление в весе** К сегодняшнему дню астрономы уже составили карты распределения темной материи не только в отдельных галактиках, но и в их скоплениях, которые содержат тысячи связанных силами взаимного притяжения галактик, и в суперскоплениях, состоящих из цепочек скоплений, раскинувшихся огромной паутиной по всему космосу. Просуммировав вес темной материи, мы обнаружим, что он в тысячи раз больше, чем у материи светлой.

**1975**

Вера Рубин показывает, что темная материя влияет на вращение галактики

**1998**

Выясняется, что нейтрино обладают малой массой

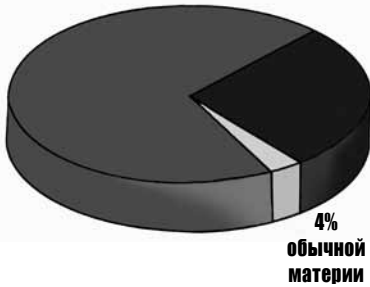
**2000**

В Млечном Пути обнаруживают присутствие MACHO

Судьба всей вселенной зависит от ее общего веса. Гравитационное притяжение уравнивает расширение вселенной, начавшееся после Большого взрыва.

Возможных исходов три. Либо вселенная настолько тяжела, что гравитация победит и со временем вселенная начнет сжиматься (замкнутая вселенная, которая заканчивает «большой давкой»), либо масса ее слишком мала, и расширение будет продолжаться вечно (открытая вселенная), либо все в ней точно уравновешено, и гравитация будет постепенно замедлять расширение, но времени это займет столько, что фактически оно не прекратится никогда. Последнее выглядит наиболее вероятным для нашей вселенной результатом — она обладает в точности тем количеством материи, которое сможет замедлять расширение, но никогда его не остановит.

73% темной энергии



23%  
темной  
материи

4%  
обычной  
материи

**WIMPy и MACHO** Из чего может состоять темная материя? Во-первых, из темных газовых облаков, тусклых звезд и неосвещенных планет. Все вместе они называются MACHO, или «массивными компактными объектами галактических гало». Альтернативно темная материя может быть новой разновидностью элементарных частиц, называемых WIMPy, это сокращение от «слабо взаимодействующих массивных частиц», которые практически не воздействуют на другую материю или свет.

MACHO астрономы отыскивали блуждающими по нашей собственной Галактике. Поскольку они велики — примерно как планета Юпитер, — их можно обнаруживать по создаваемому им гравитационному эффекту. Если большая газовая планета или несостоявшаяся звезда проходит между нами и какой-то звездой, лучи ее света искривляются гравитацией MACHO. Особенно силен этот эффект, когда MACHO находится прямо перед звездой, — в миг прохождения MACHO она выглядит особенно яркой. Это называется гравитационной линзой.

На языке теории относительности планета MACHO искривляет пространство-время, точно тяжелый шар, продавливающий резиновый лист, искривляя вокруг себя волновой фронт света (см. с. 164). Астрономы наблюдали такое усиление светимости при прохождении MACHO на фоне миллионов звезд. Однако число описанных вспышек слишком невелико, чтобы объяснить всю неучтенную пока массу Млечного Пути.

MACHO состоят из обычной материи, или барионов, построенных из протонов, нейтронов и электронов. Верхний предел количества барионов во вселенной определяется отслеживанием тяжелого изотопа водорода, дейтерия. Дейтерий образовался во время Большого взрыва, после этого звезды его не создавали, хоть и могли

**«Вселенная состоит преимущественно из темной материи и темной энергии, но что представляет собой каждая из них, мы не знаем»**

**Сол Перлмуттер, 1999**

пережигать в себе. Таким образом, измеряя количества дейтерия в первозданных космических газовых облаках, астрономы получают возможность оценивать полное число протонов и нейтронов, возникших во время Большого взрыва, поскольку механизм производства дейтерия известен точно. Это число составляет всего несколько процентов от полной массы вселенной. Стало быть, остальная материя вселенной должна иметь какую-то совершенно иную форму, например WIMПов.

На поисках WIMПов и сосредоточено сейчас основное внимание астрофизиков. Поскольку это частицы слабо взаимодействующие, обнаружение их затруднительно само по себе. Одним из кандидатов на эту роль является нейтрино. В последнее десятилетие физикам удалось измерить его массу — очень маленькую и все же не нулевую. Нейтрино создают некоторую часть вселенской массы, но, опять-таки, не всю ее. Так что места для других, еще более экзотических и новых для физики частиц, например аксионов и фотино, частиц, которые только предстоит детектировать, по-прежнему хватает. Понимание темной материи еще может пролить новый свет на мир физики.

**В сухом остатке  
Темная сторона  
вселенной**

# 48 Космологическая постоянная

Эйнштейн назвал введение космологической постоянной в уравнения общей теории относительности самым большим своим промахом. Она позволяла компенсировать гравитацию, повышая или понижая скорость расширения вселенной. Эйнштейну эта величина была, в сущности, не нужна, и он от нее отказался. Однако полученные в 1990-х новые данные потребовали ее возвращения. Астрономы установили, что загадочная темная энергия повышает скорость расширения вселенной, а это приводит к необходимости переписать современную космологию.

Альберт Эйнштейн считал, что мы живем во вселенной, которая находится в устойчивом состоянии, а не в той, что родилась при Большом взрыве. Пытаясь вывести описывающие ее уравнения, он столкнулся с затруднением. Если существует только гравитация, вселенная должна в конечном счете сжаться в точку — возможно, в черную дыру. Очевидно, однако, что в реальной вселенной этого не происходит, что она выглядит устойчивой. Поэтому Эйнштейн добавил в уравнения своей теории новый член, уравновешивающий гравитацию, описывающий своего рода «антигравитационное» отталкивание. Добавил, чтобы уравнения приобрели правильный вид, а не потому, что такая сила была ему известна. Однако эта формулировка уравнений немедленно привела к проблемам.

Если существует противодействие гравитации, то так же, как ничем не сдерживаемая гравитация способна привести к коллапсу вселенной, антигравитационная сила легко может возрастая и отрывать от нее области, в которых гравитационная «спайка» оказывается недостаточной. Эйнштейн допустить такого разрыва вселенной не хотел

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1915**

Эйнштейн публикует общую теорию относительности

**1929**

Хаббл показывает, что вселенная расширяется, и Эйнштейн отказывается от своей постоянной

и предпочел игнорировать описывающий отталкивание член уравнений, признав, впрочем, что вводить его не стоило. Другие физики тоже предпочли исключить этот параметр, отправить в архив истории. Во всяком случае, попытались. Член этот забыт не был, он сохранился в уравнениях теории относительности, однако одна из его величин, космологическая постоянная, была определена как нулевая.

**Ускоряющаяся вселенная** В 1990-х две группы астрономов начали составлять звездные карты суперновых, находящихся в удаленных галактиках, — они надеялись измерить таким образом геометрию пространства — и обнаружили, что далекие суперновые светятся слабее, чем им следовало бы. Существует несколько типов суперновых, ослепительных взрывов умирающих звезд. Суперновая типа Ia обладает предсказуемой яркостью и потому полезна для определения расстояний. Так же, как у переменных звезд цефеид, с помощью которых измерялись расстояния до галактик, позволявшие подтвердить верность уравнения Хаббла, врожденная яркость суперновой типа Ia может определяться по спектру ее свечения и позволяет сказать, как далеко от нас она находится. Способ этот прекрасно работал для достаточно близких суперновых, а вот удаленные оказались слишком тусклыми. Походило на то, что они находятся от нас дальше, чем мы полагали.

По мере открытия все более и более далеких суперновых характер их потускнения с расстоянием стал наводить на мысль, что расширение вселенной не устойчиво, как то следовало из закона Хаббла, что расширение ускоряется. Это стало для космологов огромным потрясением, от которого они не оправились и до сих пор.

Результаты, полученные для суперновых, хорошо описывались уравнениями Эйнштейна, но только если они содержали космологическую постоянную, равную не нулю, а 0,7. Эти результаты в сочетании со структурой космического микроволнового фонового излучения свидетельствовали о необходимости введения новой отталкивающей силы, противодействующей гравитации. Правда, силы очень слабой. Почему она так слаба, это и поныне остается загадкой, поскольку никаких практических причин, по которой она не могла бы значительно возрасти и, быть может, полностью возобладать над гравитацией, не обнаружено. Она очень близка к силе гравитации

**В течение 70 лет мы пытались измерить скорость, с которой замедляется расширение вселенной. А когда измерили, обнаружили, что оно ускоряется**

Майкл С. Тёрнер, 2001

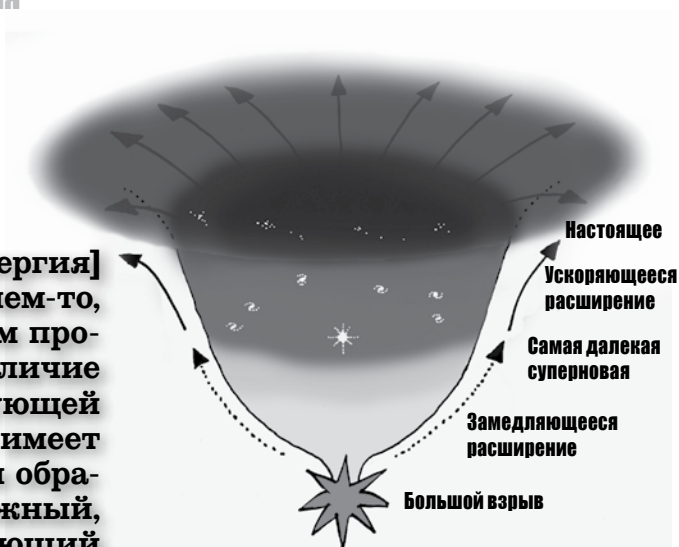
**1998**

Полученные для суперновых данные указывают на необходимость использования космологической постоянной



«Она [темная энергия] представляется чем-то, связанным с самим пространством, и в отличие от гравитирующей темной материи имеет эффект некоторым образом противоположный, противодействующий гравитации, заставляя вселенную отталкиваться от самой себя»

Брайан Шмидт, 2006



и оказывает на пространство-время, каким мы видим его сейчас, воздействие довольно слабое. Этот отрицательный энергетический член уравнения получил название «темная энергия».

**Темная энергия** Происхождение ее так и остается загадочным. Мы знаем только, что это форма энергии, связанной с вакуумом пустого пространства и порождающей отрицательное давление в областях, где нет создающей гравитационное притяжение материи. В результате в пустых областях пространства возникает инфляция. Мы примерно установили ее силу, наблюдая за суперновыми, но больше нам почти ничего о ней не известно. Мы не знаем даже, является ли космологическая постоянная действительно постоянной, — всегда ли имела она одну и ту же величину во всей вселенной и во всякое время (что справедливо для гравитации и скорости света), или величина ее менялась во времени и была при Большом взрыве одной, сейчас стала другой, а в будущем изменится снова. В наиболее общей форме темную энергию называют «квинтэссенцией» пятой силы, охватывающей все возможные способы, которыми эта сила может изменяться во времени. Однако все еще остается неизвестным, как проявляется эта неуловимая сила и как она возникла из физики Большого взрыва. Сейчас это главный предмет обсуждения для физиков.

В настоящее время мы гораздо лучше понимаем геометрию вселенной и ее состав. Открытие темной энергии навело порядок в бухгалтерии космологии, позволив определить энергетический бюджет вселенной. То есть теперь нам известно, что 4% ее составляет обычная барионная материя, 23% — экзотическая небарионная и 73% — темная

**Следует подчеркнуть, однако, что наши результаты приводят к положительному искривлению пространства, даже без ввода дополнительного члена уравнения [космологической постоянной]. Этот член необходим лишь для того, чтобы сделать возможным квазистатическое распределение материи**

**Альберт Эйнштейн, 1918**

энергия. Складываясь вместе, эти цифры дают почти точное количество материала, необходимого для сбалансированной «вселенной точной настройки», близкое к критической массе, при которой вселенная не является ни открытой, ни замкнутой.

Однако загадочные количества темной энергии означают, что, даже зная полную массу вселенной, предсказать ее будущее поведение затруднительно, поскольку зависит оно от того, станет или не станет возрастать в будущем влияние темной энергии. Если ускорение вселенной останется таким, каково оно сейчас, темная энергия будет иметь равное с гравитацией значение. Если же в какой-то момент времени ускорение возрастет, быстрое расширение вселенной преодолет действие гравитации. И тогда вселенная будет расширяться вечно, все быстрее и быстрее. Предлагались и довольно пугающие сценарии развития событий: после того как гравитация будет преодолена, слабо связанные массивные структуры совсем лишатся связи и развалятся на части, а со временем распадутся даже галактики, а следом и звезды испарятся, образовав атомарный туман. В конечном счете отрицательное давление обдерет и атомы, оставив только угрюмое море элементарных частиц.

И тем не менее, хоть космологическая складная картинка собрана и нам удалось измерить множество величин, которые описывают геометрию вселенной, существуют большие вопросы, остающиеся пока без ответов. Мы просто не знаем, что представляет собой 95% материала, из которого состоит вселенная, и что на самом деле такое эта новая сила и ее квинтэссенция. Так что время почитать на лаврах еще не настало. Вселенная продолжает хранить свою тайну.

**В сухом остатке**  
**Пятая колонна**

# 49 Парадокс Ферми

**Если где-нибудь во вселенной удастся обнаружить жизнь, это станет величайшим открытием всех времен. Энрико Ферми поражался тому, что при огромности вселенной, наличии миллиардов звезд и планет, с нами до сих пор не связалась ни одна внеземная цивилизация. В этом и состоит его парадокс.**

В 1950-м профессор физики Энрико Ферми, беседуя с коллегами во время завтрака, предположительно спросил: «Ну и где же они?» Наша Галактика содержит миллиарды звезд, галактик во вселенной тоже миллиарды, то есть звезд набирается уже не один триллион. Если хотя бы у малой части звезд имелись планеты, их насчиталось бы многое множество. Если бы на малой части планет существовала жизнь, вселенную населяли бы миллионы цивилизаций. Так почему мы их не видим? Почему они не вступают с нами в контакт?

**Уравнение Дрейка** В 1961 году Фрэнк Дрейк вывел уравнение, описывающее вероятность того, что на какой-то из планет Млечного Пути существует чужеземная, способная установить с нами связь цивилизация. Теперь его называют «уравнением Дрейка». Оно говорит, что шансы существования другой цивилизации есть, но вероятность этого все еще остается до крайности неопределенной. Карл Саган высказал однажды предположение, что в Млечном Пути может обитать около миллиона чужеземных цивилизаций, но впоследствии уменьшил это число, а с тех пор появилось мнение, что число это равно единице и относится непосредственно к нам. Прошло полвека с тех пор, как Ферми задал свой вопрос, но мы так ни одной внеземной цивилизации и не услышали. Несмотря на все наши системы связи, никто нам пока не позвонил. И чем дотошнее мы исследуем наши окрестности, тем более пустынными они выглядят. Никаких признаков существования

## СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

**1950**

Ферми задает вопрос о причинах отсутствия внеземных цивилизаций

**1961**

Дрейк выводит свое уравнение

какой-либо жизни — даже в форме простейших бактерий — не было найдено ни на Луне, ни на Марсе, ни на астероидах, ни на планетах внешней Солнечной системы, ни на их спутниках. Как не найдено и признаков помех для прохождения света далеких звезд, — признаков, позволяющих сказать, что вокруг них вращаются гигантские орбитальные машины, собирающие энергию этих звезд. И нельзя сказать, что никто их не искал. На кону стоит очень многое, и потому для поисков внеземного разума предпринимаются огромные усилия.

### **Поиски жизни** А как вообще ведутся

поиски жизни? Первый путь — это поиск микробов в пределах Солнечной системы. Ученые дотошно изучили камни, доставленные с Луны, — базальт без каких-либо признаков жизни. Предполагалось, что на метеоритах, залетевших к нам с Марса, были обнаружены останки бактерий, однако так и не доказано, что эти яйцевидные пузырьки были когда-то фрагментами внеземной жизни, а не появились как загрязнения уже после падения метеоритов на Землю или не были созданы естественными геологическими процессами. Но даже и без образцов камней камеры, установленные на космических кораблях и их посадочных модулях, обшарили поверхности Марса, астероидов и даже спутника одной из планет внешней Солнечной системы — Титана, который вращается вокруг Сатурна.

Впрочем, поверхность Марса — сухая пустыня, покрытая вулканическим песком и камнями и немного похожая на чилийскую пустыню Атакама. Поверхность Титана влажна, она купается в жидком метане, но жизнь пока что не обнаружена и там. В качестве объекта будущих поисков жизни в Солнечной системе выбран спутник Юпитера Европа — под ее ледяной поверхностью могут крыться моря жидкой воды. Планируется посадить на нее зонд, который просверлит ледяную корку и заглянет под нее. Среди спутников планет внешней Солнечной системы найдены геологически активные, излучающие тепло под действием гравитации, которая сдавливает их и заставляет вращаться вокруг гигантских газовых планет. То есть жидкая вода может оказаться во внешней Солнечной системе не такой уж и редкостью, а это позволяет надеяться, что когда-нибудь в ней обнаружат жизнь. Космические корабли тщательнейшим образом стерилизуют, чтобы они не завезли туда с Земли чуждых микробов.

**«Кто мы? Мы обнаружили, что живем на незначительной планете банальной звезды, а та затеряна в Галактике, засунутой в некий забытый богом угол вселенной, в которой галактик гораздо больше, чем людей»**

**Вернер фон Браун, 1960**

**1996**

Найденные в Антарктике метеориты содержат намеки на существование примитивной жизни на Марсе

## Уравнение Дрейка

$$N = N_* \times f_p \times n_e \times f_i \times f_c \times f_L,$$

где:

$N$  — число имеющихся в Млечном Пути цивилизаций, чье электромагнитное излучение может быть обнаружено;

$N_*$  — число звезд в нашей Галактике;

$f_p$  — доля звезд, обладающих планетными системами;

$n_e$  — среднее количество планет с пригодной для жизни средой;

$f_i$  — доля планет с пригодной для жизни средой, на которых действительно возникает жизнь;

$f_i$  — доля обитаемых планет, на которых возникает разумная жизнь;

$f_c$  — доля цивилизаций, создающих технологию, признаки существования которой можно заметить из космоса;

$f_L$  — период времени жизни такой цивилизации, в течение которого она испускает доступные для регистрации из космоса сигналы (для Земли этот показатель пока еще очень мал).

Понятно, что микробы «звонить» нам не станут. А что можно сказать о более развитых животных или растениях? Теперь, когда обнаружены планеты, вращающиеся вокруг далеких звезд, астрономы планируют «препарировать» исходящий от них свет в поисках намека на присутствие там химических веществ, способных поддерживать жизнь или указывать на ее существование. Так могут быть найдены спектральные следы озона или хлорофилла, однако это потребует точных измерений, которые, возможно, проведет следующее поколение космических кораблей, подобных «Детектору планет земного типа», значившемуся в планах НАСА. Когда-нибудь эти корабли могут и обнаружить сестру нашей Земли, но, если это произойдет, будет ли она населена людьми, рыбами либо динозаврами — или просто содержать пустые, лишенные жизни континенты?

**Контакт** Жизнь на других планетах может развиваться не так, как на Земле. Поэтому нельзя сказать, что инопланетяне смогут общаться с нами, землянами. С тех пор как заработало радио и телевидение, их сигналы уходят в космос, распространяясь со скоростью света. И любой телезритель, живущий на Альфа Центавра (4 световых года от нас) может смотреть земные передачи четырехлетней давности, а сейчас наслаждается фильмом «Контакт». Черно-белые фильмы уже успели добраться до звезды Арктур, а Чарли Чаплина вполне могли признать кинозвездой и на Альдебаране. Земля посылает во вселенную множество сигналов — была бы только антенна, чтобы их принимать. Разве другие развитые цивилизации не стали бы делать то же самое? Вот радиоастрономы и обшаривают ближние к нам звезды в поисках сигналов не естественного происхождения.

**«Наше Солнце — одна из 100 миллиардов звезд нашей Галактики. А наша Галактика — одна из миллиардов заполняющих вселенную галактик. Полагать, что мы единственные в столь колоссальном мире живые существа, — верх высокомерия»**

**Карл Саган, 1980**

Спектр радиоволн огромен, поэтому поиски ведутся на частотах, близких к ключевым энергетическим переходам, таким как у водорода, — они должны быть одинаковыми во всей вселенной. Идет поиск регулярных или структурированных сигналов, причем таких, какие не создает ни одно из известных нам астрономических тел. В 1967 году кембриджская аспирантка Джоселин Белл перепугалась, обнаружив исходящие от звезды регулярные импульсы радиоволн. Она подумала, что наткнулась на чужеземную азбуку Морзе, однако эти сигналы испускала вращающаяся нейтронная звезда неизвестного в то время типа — теперь их называют «пульсарами». Поскольку процесс сканирования тысяч звезд занимает долгое время, в США была создана программа SETI (*Search for ExtraTerrestrial Intelligence* — Поиски внеземного разума). Но за многие годы ее существования никаких странных сигналов обнаружить не удалось. К этой работе подключаются и другие радиотелескопы, однако пока впустую.

**Закрыто на обед** Итак, почему же ни одна цивилизация не возвращает нам наши сигналы и не посылает собственные? Почему парадокс Ферми так и остается справедливым? Идей на этот счет высказано много. Возможно, жизнь в ее высокоразвитом, позволяющем посылать сигналы состоянии существует лишь очень недолгое время. А это почему? А потому, наверное, что разумная жизнь всегда быстро уничтожает сама себя. Быть может, она саморазрушительна и протянуть долго не может, отчего и шансы вступить в связь с другой находящейся неподалеку разумной жизнью у нее очень малы. Впрочем, есть и сценарии более параноидальные. Возможно, инопланетяне просто не желают иметь с нами дела, намеренно нас изолируют. А может, они просто сильно заняты и до нас у них пока еще не дошли руки.

**В сухом остатке  
Есть там кто-нибудь?**



# 50 Антропный принцип

**Антропный принцип утверждает, что вселенная такова, какова она есть, просто потому, что, будь она другой, не было бы нас, наблюдающих ее. Это одно из объяснений причины, по которой каждый физический параметр — от силы ядерных взаимодействий до объема темной энергии и массы электрона — имеет то значение, какое имеет. Измените любой из них хотя бы ненамного, и вселенная окажется необитаемой.**

Если бы сильное ядерное взаимодействие было чуть иным, протоны и нейтроны не соединились бы в ядра, а значит, не формировались бы и атомы. Химии не существовало бы. Не было бы углерода, а с ним и биологии, и людей. Если же нас не будет, кто станет «наблюдать» вселенную, кто помешает ей существовать лишь в виде квантового супа вероятностей?

Подобным же образом, даже если бы атомы существовали и вселенная развивалась бы так, чтобы создать все известные нам ныне структуры, но темная энергия оказалась бы немного сильнее, галактики и звезды уже начали бы разваливаться на части. То есть крошечное изменение в значениях физических постоянных, в величине сил и взаимодействий или масс частиц может привести к катастрофическим последствиям. Иными словами, вселенная, похоже, настроена очень тонко. Случайно ли то, что мы живем во вселенной, которая просуществовала 14 миллиардов лет и в которой темная энергия и гравитация уравновешивают друг друга, а элементарные частицы имеют те формы, какие они имеют?

**Именно так** Утверждение о том, что человечество — это нечто особенное, а вся вселенная только для него устроена и была, выглядит, пожалуй, слишком наглым, однако антропный принцип объясняет, что

**СТРЕЛА ВРЕМЕНИ**  
**1904**

Альфред Уоллес обсуждает место человека во вселенной

**1957**

Дикке утверждает, что поведение вселенной ограничивают биологические факторы

ничего удивительного в нем нет. Если бы любое из взаимодействий было несколько иным, мы не могли бы увидеть это, поскольку нас просто-напросто не было бы. Планет существует множество, но, насколько нам известно, лишь на одной имеются правильные, необходимые для жизни условия, — точно так же вселенная могла бы сформироваться многими способами, но наше существование обеспечил только один из них. Подобным же образом, если бы мои родители не познакомились, если бы двигатель внутреннего сгорания не был изобретен в должное время и мой отец не смог бы поехать на север и познакомиться там с моей матерью, я не появилась бы на свет. Это не означает, что вся вселенная развивалась именно так, чтобы обеспечить мое рождение. Но тот факт, что я существую, в конечном счете требовал, среди прочего, чтобы двигатель был изобретен тогда-то и тогда-то, а это сужает диапазон вселенных, в которых меня можно бы было найти.

Антропный принцип использовался Робертом Дикке и Брэндоном Картером в физике и космологии, однако философам он знаком довольно давно. Одна его формулировка, слабый антропный принцип, гласит, что, будь мировые константы иными, нас здесь не было бы, поэтому сам факт нашего существования ограничивает свойства обитаемых физических вселенных, в которых мы могли появиться. Другая формулировка, сильный антропный принцип, подчеркивает важность нашего существования, утверждая, что жизнь есть необходимый результат возникновения вселенной. К примеру, наблюдатели необходимы для того, чтобы придать квантовой вселенной конкретный вид самим фактом ее наблюдения. Джон Барроу и Фрэнк Типлер предложили еще один вариант: поскольку обработка информации есть фундаментальное назначение вселенной, она обязана порождать создания, способные обрабатывать информацию.

**Многие миры** Чтобы породить человечество, требуется вселенная достаточно старая, такая, в которой у ранних поколений звезд нашлось достаточно для создания углерода время, а кроме того, ее сильное и слабое ядерные взаимодействия должны быть «именно такими», какие допускают возникновение ядерной физики и химии.

**«Наблюдаемые значения всех физических и космологических величин не являются равновероятными, они ограничены требованием, чтобы существовали места, в которых могла бы развиваться основанная на углероде жизнь, а... вселенная была бы достаточно стара для того, чтобы эта жизнь в ней уже развилась»**

Джон Барроу и Фрэнк Типлер, 1986

1973

Брэндон Картер обсуждает антропный принцип

## Антропные полости

Антропной дилеммы можно избежать, постулировав существование множества параллельных вселенных, или «вселенских полостей», наряду с той, в которой живем мы.

В каждой полости физические параметры могут быть слегка иными. Эти изменения правят развитием каждой вселенной и тем, обеспечивает ли та или иная пригодную для развития жизни нишу. Насколько нам известно, жизнь привередлива, поэтому выбрать она могла бы лишь несколько вселенных. Но,

поскольку их много, такая возможность у нее имеется, и потому наше существование не столь уж и невероятно.



Мало того, гравитация и темная энергия должны уравновешивать друг дружку, не раздирая вселенную на части, но позволяя возникать звездам. Далее, звезды должны жить достаточно долго для того, чтобы обзавестись планетами, причем достаточно большими, чтобы мы получили планету с приятной температурой, водой, азотом, кислородом и прочими веществами, необходимыми для зарождения жизни.

Физикам не составляет труда представить себе вселенные, обладающие иными свойствами, и некоторые ученые полагают, что такие вселенные вполне могут существовать наряду с нашей. Существовать как параллельные, множественные версии вселенных, из которых для нас пригодна только одна.

Идея параллельных вселенных согласуется с антропным принципом, поскольку допускает наличие вселенных, в которых мы существовать не можем. Они могут быть многомерными, а могут отличаться одна от другой в соответствии с теми принципами, соблюдения которых квантовая теория требует от наблюдений, чтобы они могли породить результаты экспериментов (см. с. 115).

**А с другой стороны** У антропного принципа имеются и свои критики. Одни считают его трюизмом — все устроено так потому, что все так устроено, — ничего особенно нового нам не говорящим. Другим не нравится, что нам досталась для исследования только одна особенная вселенная, они предпочитают искать в математике пути, которые автоматически выводили бы нашу вселенную из самих законов физики.

Третьи, сторонники теории струн и М-теории, пытаются заглянуть в поисках тонкой настройки мировых констант за пределы Большого взрыва. Они видят в предшествовавшем Большому взрыву квантовом море своего рода энергетический ландшафт и спрашивают, чем,

скорее всего, кончит вселенная, если позволить ей просто катить себе дальше и расширяться. Например, если пустить мяч вниз по очень неровному склону горы, он остановится в одних местах с большей вероятностью, чем в других, таких как дно долины. Поэтому вселенная, пытаясь минимизировать свою энергию, вполне могла совершенно естественным образом находить определенные сочетания параметров, безотносительно к тому, появимся ли мы в ней миллиарды лет спустя.

Сторонники антропного принципа и те, кто ищет математические средства, приводящие к вселенной, которая нам известна, расходятся в ответах на вопрос о том, как мы попали туда, где мы есть, да, собственно, и в том, стоит ли этот вопрос задавать. Выбравшись за пределы Большого взрыва и наблюдаемой вселенной в царство параллельных миров и существовавших до взрыва энергетических полей, мы вступаем на территорию философии. Но что бы ни было первым толчком, заставившим вселенную принять ее теперешнее обличие, нам повезло хотя бы в том, что через миллиарды лет после этого толчка она стала такой, какова теперь. Понятно же, что создание химии, необходимой для возникновения жизни, требует времени. И нам более чем повезло жить именно в тот конкретный период истории вселенной, когда темная энергия настроена относительно благодушно и уравнивает гравитацию.

**«Чтобы испечь яблочный пирог, начиная с нуля, нужно сначала создать вселенную»**

**Карл Саган, 1980**

**В сухом остатке**  
**Именно такая вселенная**

## Словарь терминов

**Атом.** Мельчайшая единица материи, способная существовать самостоятельно. Атомы содержат твердые внутренние ядра, состоящие из (положительно заряженных) протонов и (не заряженных) нейтронов и окруженные облаками (отрицательно заряженных) электронов.

**Бозон.** Частица с симметричной волновой функцией; два бозона могут находиться в одном и том же квантовом состоянии (*см. также* Фермион).

**Вакуум.** Пространство, которое не содержит атомов. В природе он не существует — даже открытый космос содержит несколько атомов на кубический сантиметр, — однако в лаборатории физики подбираются к нему довольно близко.

**Возраст вселенной.** *см.* Вселенная.

**Волновая функция.** В квантовой теории — математическая функция, которая описывает все характеристики некоторой частицы или тела, включая вероятность того, что они обладают определенными свойствами или находятся в определенном месте.

**Волновой фронт.** Линия, проходящая через пик волны.

**Вселенная.** Все пространство и время. По определению, она включает в себя все существующее, однако некоторые физики говорят о параллельных вселенных, отдельных от нашей. Наша вселенная имеет возраст примерно в 14 миллиардов лет, определенный по скорости ее расширения и возрастам звезд.

**Газ.** Облако не связанных атомов или молекул. Газы не имеют четких границ, но могут ограничиваться каким-либо сосудом.

**Галактика.** Группа или облако из миллионов звезд, удерживаемых вместе гравитацией. Наш Млечный Путь представляет собой спиральную галактику.

**Гравитация.** Фундаментальное взаимодействие, посредством которого массы притягивают друг друга. Гравитация описывается общей теорией относительности Эйнштейна.

**Давление.** Определяется как сила на единицу площади. Давление газа — это сила, которую его атомы или молекулы прилагают к внутренней поверхности содержащего газ сосуда.

**Деформация.** Величина растяжения тела при его растягивании, отнесенная к единице длины.

**Дифракция.** Характер распространения волн, минующих острую грань, например морских волн, проходящих сквозь отверстие в стене гавани.

**Длина волны.** Расстояние между гребнями одной волны и следующей непосредственно за нею.

**Запутанность.** В квантовой теории — идея, согласно которой частицы, бывшие связанными в одной точке времени, затем уносят с собой информацию и могут использоваться для мгновенной передачи сигнала.

**Излучение черного тела.** Свет, излучаемый черным объектом при определенной температуре и обладающий характерным спектром.

**Изотоп.** Химический элемент, существующий в разных формах — с одним и тем же числом протонов, но с разными числами нейтронов в ядре, то есть и с разными атомными массами.

**Импульс.** Произведение массы на скорость, показывающее, как трудно остановить что-либо, уже приведенное в движение.

**Инерция.** *см.* Масса.

**Интерференция.** Комбинирование волн с различными фазами, которое может приводить к их усилению (если они в фазе) или ослаблению (если не в фазе).

**Кванты.** Мельчайшие элементарные единицы энергии, используемые в квантовой теории.

**Кварк.** Фундаментальная частица; три кварка комбинируются, образуя протон или нейтрон. Форма материи, образованная кварками, называется адронами.

**Корпускулярно-волновой дуализм.** Поведение, в частности, света, которое иногда похоже с волновым, а иногда с поведением частицы.

**Космическое микроволновое фоновое излучение.** Легкое микроволновое свечение, которое наполняет небо. Это послесвечение Большого взрыва, остывшее и испытавшее красное смещение к температуре порядка 3 К.

**Красное смещение.** Сдвиг длины волны света, испускаемого удаляющимся объектом; причину его составляет эффект Доплера или космологическое расширение. В астрономии используется для измерения расстояний до удаленных звезд и галактик.

**Кубиты.** Квантовые биты. Похожи на компьютерные «биты», но несут квантовую информацию.

**Масса.** Свойство, эквивалентное числу атомов или количеству энергии, которые содержит что-либо. Инерция — это схожая идея,

описывающая массу в терминах сопротивления движению, так что тяжелое (массивное) тело привести в движение труднее.

**Многих миров гипотеза.** В квантовой теории и космологии — идея, согласно которой существует множество параллельных вселенных, которые ветвятся при возникновении события, а мы в каждый данный момент времени находимся в одной из ветвей.

**Наблюдатель.** В квантовой теории наблюдатель — это некто, выполняющий эксперимент и измеряющий его результат.

**Напряжение.** Сила на единицу площади, внутренне ощущаемая телом, когда к нему прилагается нагрузка.

**Отражение.** Обращение волны, ударяющей в какую-либо поверхность, — например, луча света, отскакивающего от зеркала.

**Поля.** Средства передачи взаимодействия на расстояние. Электричество и магнетизм — это поля, гравитация тоже.

**Преломление.** Изгибание волн, возникающее обычно вследствие их замедления при прохождении через какую-либо среду, например, света через призму.

**Пространственно-временная метрика.** В общей теории относительности — геометрическое пространство, скомбинированное со временем так, что они образуют одну математическую функцию.

Для ее визуального представления часто используется резиновый лист.

**Сила.** Подъем, толчок или рывок, заставляющий изменяться движение чего-либо. Второй закон Ньютона определяет силу как величину, пропорциональную создаваемому ею ускорению.

**Скорость.** Быстрота движения в определенном направлении. Это расстояние, которое движущееся в этом направлении тело проходит за определенное время.

**Случайность.** Исход события, определяемый только случаем. Никакие конкретные исходы не являются предпочтительными.

**Спектр.** Последовательность электромагнитных волн — от радиоволн до видимого света, рентгеновских и гамма-лучей.

**Суперновая.** Взрыв звезды, масса которой превышает некоторый предел; взрыв происходит, когда звезда достигает конца своей жизни.

**Турбулентность.** Когда жидкость течет слишком быстро, она становится нестабильной и турбулентной, в ней возникают завихрения и вихоры.

**Упругость.** Упругие материалы подчиняются закону Гука. Они растягиваются на длину, пропорциональную приложенной силе.

**Ускорение.** Изменение в скорости чего-либо за данное время.

**Фаза.** Относительное смещение между одной волной и другой, измеренное в долях длины волны. Сдвиг на полную длину волны составляет 360 градусов; при относительном смещении в 180 градусов две волны находятся точно в противофазе (см. также Интерференция).

**Фермион.** Частица, следующая принципу исключения Паули, согласно которому никакие два фермиона не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии (см. также Бозон).

**Фотон.** Свет, ведущий себя как частица.

**Частота.** Скорость, с которой гребни волны проходят определенную точку.

**Электричество.** Поток электрических зарядов. Он обладает определенным напряжением (энергия), может создавать ток (течение) и может замедляться или блокироваться сопротивлением.

**Энергия.** Свойство чего-то, определяющее его способность к изменению. Общее ее количество сохраняется, но может распределяться между различными типами энергии.

**Энтропия.** Мера беспорядка. Чем более упорядоченно что-либо, тем меньше его энтропия.

**Ядро.** Твердая сердцевина атома, состоящая из протонов и нейтронов, удерживаемых вместе сильным ядерным взаимодействием.



# Предметный указатель

- А**  
 абсолютный ноль 40–43, 124, 126  
 Авогадро число 32, 33  
 адроны 145, 154  
 альфа-излучение 130  
 антиматерия 132–135, 144–146  
 антропный принцип 200–203  
 атомы 204  
 аэродинамика 53–54
- Б**  
 бабочки эффект 48, 50  
 барныоны 146, 189, 191  
 белый карлик 122  
 Бернулли уравнение 52–55  
 Бернулли, Даниил 54  
 бета-излучение 130, 145, 150  
 Бозе, Шатьендранат 123, 126  
 Бозе–Эйнштейна конденсаты 126  
 бозоны 123, 126, 135, 145, 146, 147, 153–155, 204  
 Большой взрыв 175, 179, 180–183, 186–187  
 Бор, Нильс 101–102, 108, 109, 137  
 Бройль, Луи-Виктор де 99, 102  
 броуновское движение 44–47, 98  
 Брэгг, Уильям 69, 103  
 Брэгга закон 68–71
- В**  
 вакуум 35, 88–89, 205  
 Вентури трубка 54  
 вечное движение 38–39, 124  
 вибрации 24–27, 156–157  
 вода 58, 60–66  
 водород 101–102, 130, 133, 140–143, 181–182, 191  
 волновое уравнение 100–103  
 волны 22, 57–58, 71, 88–91, 96, 100  
 водны длина 60–61, 89, 99, 205  
 времени растяжение 161–162  
 время 161–163, 165–166, 168  
 вселенная и температура 41–42, 94, 186  
 высота 34–35, 41
- Г**  
 газа идеального закон 32–35  
 газовая среда 43  
 Галилео Галилей 5–6, 20–21  
 Галилео эксперимент 10  
 гамма-лучи 59, 89, 105, 130
- Гаусса закон 90–91  
 Гейзенберг, Вернер 106, 108  
 Гете, Иоганн Вольфганг, фон 59  
 глюоны 146–147  
 гравитация 204  
 гравитон 147  
 Гук, Роберт 29, 31, 57  
 Гаука закон 28–31  
 Гюйгенс, Христиан 61  
 Гюйгенса принцип 60–63, 68
- Д**  
 давление 32, 34–35, 205  
 Дирак, Пол 91, 114, 132, 134  
 дифракция 68, 72–75, 99, 204  
 диффузия 45–46  
 ДНК двойная спираль 68, 70–71  
 долгота 30–31  
 Доплер, Кристиан 77  
 Доплера эффект 76–79, 178  
 Дрейка уравнение 196, 198
- Е**  
 емкости 86–87
- З**  
 замерзшие звезды 170  
 заряд 80–81, 84  
 звезды и гравитационные волны 166  
 звук 7, 58, 62, 76–79  
 Земли вращение 25  
 зонд на Титане 62–63
- И**  
 излучение 95, 130, 138–139  
 излучение черного тела 43, 93–95, 204  
 изоляторы 81–82  
 импульс 23, 55, 204  
 индукция 84–87, 91  
 инерция 5–8  
 интерференция 70, 73, 75, 98–99, 204  
 исключения принцип 120–123, 126, 170  
 искривление света 57–58, 64–67, 165, 166, 190
- К**  
 квантовая теория и запутанность 116, 118–119, 204  
 квантовая теория и относительность 132, 134  
 квантовая теория, развитие 75, 95, 98, 100, 102–103, 106–107  
 квантовая электродинамика (КЭД) 150–151  
 кванты 95, 97, 100, 167, 205  
 кварки 144, 145–147, 181, 205
- Кельвин, лорд 43, 55  
 Кельвина шкала 40–41  
 Кеплер, Иоганн 12–13, 15  
 Кеплера законы 12–15, 17  
 кинетическая энергия 21, 22–23, 25  
 Копенгагенская интерпретация 108–111, 112, 116  
 корпускулярно-волновой дуализм 97–99  
 космические волны 94, 179, 182–183, 185–186, 204  
 космологическая постоянная 192–195  
 красное смещение 79, 175, 178–189, 181, 205  
 криптография 116, 118–119  
 кровотоки 53–54, 78  
 Купера пары 125–127
- Л**  
 Лейбниц, Готфрид 4, 22  
 лептоны 145–147  
 линзы 65–67, 74–75, 81  
 Лоренц, Эдвард 49–50
- М**  
 магнетизм (электромагнетизм) 89, 91  
 магнитные поля 91  
 Максвелл, Джеймс Клерк 86, 90  
 Максвелла демон 39  
 Максвелла уравнения 88–91, 94  
 масса 5, 9, 10, 16, 22, 23, 204  
 матричная механика 106  
 Мах, Эрнст 4  
 Маха принцип 4–7, 134  
 маяки 74–75, 86  
 маятники 20, 22, 24–25, 61  
 мезоны 131, 146  
 метаматериалы 66  
 микроволновое излучение 179, 182, 185–186, 187  
 микроволновой зонд 185  
 микроволны 59, 89  
 Млечный Путь 171, 173, 176–178, 181, 191, 196  
 многих миров гипотеза 115, 204  
 мобильные телефоны 89, 90–91  
 моли 32–33  
 молния 80–82  
 М-теория 158, 183, 203  
 муоны 146
- Н**  
 Навье-Стокса уравнение 55  
 напряжения и деформация 29, 205
- напряжение электрическое 82–83, 86  
 нейтрино 122, 134–135, 144–145, 191  
 нейтрон 122–123  
 нейтроны 80, 99, 105, 121–122, 128, 130–131, 133  
 неопределенности принцип 104–108, 110  
 Нептун 18, 51  
 нуклоны 130  
 Ньютон, Исаак 11, 31  
 Ньютон, Исаак и движение 8–11  
 Ньютон, Исаак и теория цвета 56–59  
 Ньютон, Исаак и тяготение 6, 16–19  
 Ньютона закон 16–19  
 Ньютона законы 8–11, 16  
 ньютоновская теория 56–59
- О**  
 Ольберса парадокс 172–175  
 Ома закон 83  
 относительности общая теория 164–167, 184, 192  
 относительности специальная теория 162–163  
 относительности теории 7, 91, 98, 160, 162–167, 192  
 отражение 66, 93–94, 205  
 отражение света 66
- П**  
 параллельная вселенная 115, 202–203  
 Паули, Вольфганг, 122  
 Планк, Макс 93, 163  
 Планка закон 92–95, 100  
 Подольский, Борис 116–119  
 позитроны 132–134  
 поиски жизни 196–199  
 полупроводники 81, 99  
 потенциальная энергия 21, 25  
 правой руки правило 84–87  
 преломление света 64–67, 205  
 принцип исключения 121  
 простое гармоническое движение 24–27  
 пространственно-временная метрика 165–166, 168, 205  
 пространство-время 165–168  
 протоны 80, 99, 121, 128–129, 131, 133  
 прыжки с тарзанкой 30  
 пылесосы 166, 199  
 пыльца 44–45

**Р**

радиоволны 89  
 радуга 56, 58–59  
 расширение вселенной  
 176–179, 181, 184, 187,  
 192–195  
 расщепление 136–139  
 Резерфорд, Эрнест, 128–131  
 Резерфорда работа 128–131  
 резонанс 26–27  
 Рентген, Вильгельм 71  
 Розен, Натан 116–119

**С**

Сатурн 61–63  
 сверхпроводимость  
 43, 124–127  
 свет и тепло 92–95  
 свет и цвет 11, 31, 56–59,  
 93–94  
 свет инфракрасный 59  
 свет ультрафиолетовый 59,  
 94–99  
 сильное ядерное взаимодей-  
 ствие 131, 140, 146, 149, 200  
 скорость звука 7, 160  
 скорость и законы  
 движения 8–9  
 скорость света 22, 160–163  
 слабое ядерное взаимодей-  
 ствие 146, 149–152, 202  
 Снеллиуса закон 64–67  
 сопротивление 82–83  
 сохранение 20–23, 54–55

спутник 94  
 стандартная модель  
 и физика элементарных  
 частиц 144–147, 155  
 статическое  
 электричество 80  
 стекло 64–66, 74–75  
 струн теория 156–159, 183,  
 203  
 супержидкости 125, 150  
 Сцилард, Лео 137–138, 139

**Т**

тау 146  
 телепортация 117, 119  
 телескоп 166, 178–179  
 темная материя 188–191  
 темная энергия 192,  
 194–195, 200, 202  
 температура вселенной  
 41–42, 94  
 терменвокс 26  
 термодинамика 36–39, 94  
 ток электрический 82–84, 87  
 трансформаторы 87

**У**

уран 136–137, 139  
 ускорение 9–10, 16, 18, 204  
 устойчивое состояние  
 вселенной 180, 183, 192

**Ф**

Фарадей, Майкл 85–86  
 Фейнман, Ричард 150, 159

Фейнмана диаграммы  
 148–151  
 Ферма, Пьер 66–67  
 Ферми парадокс 196–199  
 Ферми, Энрико 121, 137–138  
 фермионы 121–122, 126,  
 146–147, 204  
 Флеминг, Джон Амброс  
 фотоны 86–87, 96–99, 101,  
 105, 205  
 фотоэлектрический эффект  
 96–99

фракталы 46, 50  
 Франклин, Бенжамин 81

**Х**

Хаббла закон 176–179, 181  
 «Хаббл», телескоп 166,  
 178, 179  
 хаоса теория 48–51  
 Хиггса бозон 147, 152–155  
 Хиггса поле 153  
 холодное слияние 142  
 цвет звезды 92–93  
 цены 26, 83

**Ч**

частиц ускорители 127, 133,  
 147, 154  
 частота волн 61, 204  
 часы 26, 30–31, 61  
 черные дыры 166–171, 183

**Ш**

Шредингер, Эрвин 114

Шредингера волновое  
 уравнение 100–103, 106,  
 108, 114

Шредингера кот 112–115

**Э**

Эйнштейн, Альберт 98  
 Эйри, Джордж, Эйри  
 кольца 74  
 электричество 204  
 электродвижущая сила 85  
 электрослабое  
 взаимодействие 151–152  
 элементарные частицы  
 128–131, 144–146, 148–150  
 энергетические уровни  
 100–102, 109  
 энергия 204  
 энергия и масса 5, 22  
 энергия упругости 21, 28–31  
 энтропия 37–39  
 ЭПР парадокс 116–119  
 эргодическая  
 теория 51

**Я**

ядер деление 136–139, 150  
 ядер слияние 140–143,  
 181–182  
 ядерная  
 энергия 137–138  
 ядерное оружие 106,  
 138–139, 150  
 ядра 128–131, 136–137,  
 144–145, 205

ББК 84.4

Б\_\_

Copyright © Joanne Baker 2007

Джоанн Бейкер изучала физику в Кембридже, защитила диссертацию в Сиднее. Много лет она работает научным редактором в авторитетном во всем мире журнале *Science*, где ведаёт науками о космосе и Земле. Помимо тома «Физика» для проекта «50 идей, о которых нужно знать», она написала также книги «Вселенная» и «Квантовая физика».

### **Бейкер, Джоанн**

Б\_\_ Физика. 50 идей, о которых нужно знать. — Пер. с англ. С. Ильина. — М.: Фантом Пресс, 2014. — 208 с.

Мы сталкиваемся с физикой ровно в тот момент, как открываем глаза, проснувшись. Будильник нам показывает время, зеркало отражает световые волны, а наши мобильные телефоны отслеживаются спутниками, вращающимися благодаря гравитации. Что бы случилось, если бы человек не проник в природу электричества, не научился рассчитывать силу тяжести, ничего не знал о сохранении энергии, понятия не имел о полупроводниках? Да попросту он не был бы человеком — во всяком случае, разумным. В этой книге физика раскрывается во всей красоте больших идей, от вроде бы понятных со школы законов Ньютона и световых волн до темной материи, теории хаоса и теории струн. Это прекрасный путеводитель по удивительному, почти магическому миру фундаментальных законов природы, которые завораживают и восхищают.

ISBN 978-5-86471-\_\_\_\_- © С. Ильин, перевод, 2014

© «Фантом Пресс», оформление, издание, 2014

Джоанн Бейкер

## **ФИЗИКА 50 идей, о которых нужно знать**

Перевод  
*Сергей Ильин*

Редактор  
*Игорь Алюков*

Корректоры  
*Ольга Андрюхина,  
Виктория Рябцева*

Директор издательства  
*Алла Штейнман*

Подписано в печать \_\_\_\_\_.2014.

Формат 70×90/16.

Печать офсетная.

Заказ № \_\_\_\_.

Тираж \_\_\_\_ экз.

Гарнитура «NewBaskervilleC».

Издательство «Фантом Пресс»:

Лицензия на издательскую  
деятельность

код 221 серия ИД № 00378

от 01.11.99 г.

127015 Москва,

ул. Новодмитровская, д. 5А, 1700

Тел.: (495) 787-34-63

Электронная почта:

phantom@phantom-press.ru

Сайт: www.phantom-press.ru



Отпечатано  
в полном соответствии  
с качеством  
предоставленного  
электронного  
оригинал-макета  
в ОАО «Ярославский  
полиграф-комбинат»  
150049, Ярославль,  
ул. Свободы, 97