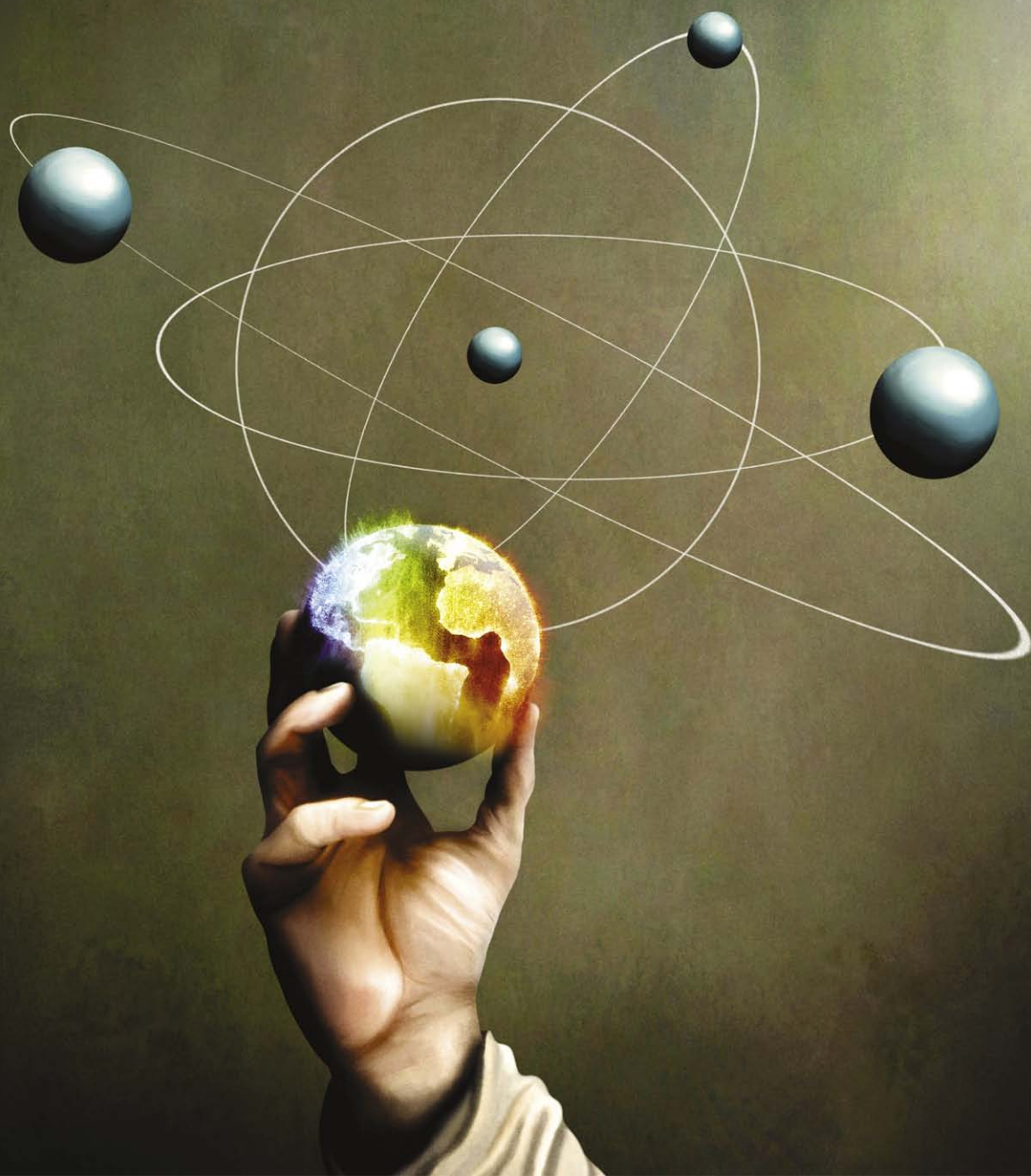


АЛЛА КАЗАНЦЕВА

# ФИЗИКА

ИСКУССТВО ПОНИМАНИЯ МИРА



История и наука Рунета

АЛЛА КАЗАНЦЕВА

# ФИЗИКА

ИСКУССТВО ПОНИМАНИЯ МИРА



Издательство АСТ  
МОСКВА

УДК 53  
ББК 22.3  
К14

Дизайн серии *Александра Воробьева*

**Казанцева, Алла Борисовна**

К14 Физика. Искусство понимания мира / Алла Казанцева. — Москва : Издательство АСТ, 2024. — 352 с. — (История и наука Рунета. Подарочное издание).

ISBN 978-5-17-164737-7

У многих физика ассоциируется с малопонятным школьным предметом, который не имеет отношения к жизни. Однако на самом деле это одна из тех наук, которые позволили сделать мир вокруг нас таким, какой он есть: машины, ракеты, космические станции, интернет, мобильная связь и прочие блага технической цивилизации. Физика позволила нам получить ответы на самые разнообразные вопросы:

- Что такое «шумовое загрязнение»?
- Почему одни звуки разрушают наш организм, а другие — лечат?
- Кто постареет быстрее: человек на Земле или космонавт, летящий к другой планете?
- Откуда берется вездесущая радиация и как она на нас воздействует?
- Что представляет опасность для космонавтов при межпланетных путешествиях?
- Как можно увидеть звук?
- Почему малые дозы радиации полезны, а большие губительны?
- Как связаны мобильный телефон и плохая память?
- Почему правильно подобранное освещение — залог хорошей работы и спокойного сна?

Это и многое другое вы найдете на страницах настоящей книги.

Казанцева Алла Борисовна — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и экспериментальной физики МПГУ, финалист конкурса РАН 2019 и 2021 за лучшие работы по популяризации науки. Настоящее издание объединило два ее известных труда: «Физика в быту» и «Физика для всех: от атома до космоса».

**УДК 53**  
**ББК 22.3**

ISBN 978-5-17-164737-7

© Казанцева А.Б., 2024  
© ООО «Издательство АСТ», 2024

# ФИЗИКА В БЫТУ

## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Эта книга и о физике, и о нашей жизни в современном мире.

Для большинства людей физика ассоциируется со школой: это трудный и малопонятный предмет, имеющий небольшое отношение к повседневной жизни. Понятно, что все современные технологии так или иначе базируются на физических законах, но надо ли каждому пользователю знать и понимать эти законы? И всё же физика имеет гораздо большее отношение к повседневной жизни, чем это кажется на первый взгляд. В этой книге мы хотим рассказать о некоторых физических явлениях и законах, которые позволят вам лучше понимать и оценивать риски обитания в современном мире, особенно в больших городах. Как вы полагаете, к примеру: что причиняет бóльший вред нашему здоровью — курение, городские шумы или электромагнитное загрязнение? А что опаснее — жить возле атомной электростанции или возле тепловой? Эти и многие другие животрепещущие вопросы будут затронуты в книге.

Она состоит из четырёх частей. В первой части обсуждается звуковая составляющая нашей жизни. Мы расскажем, что такое звук и в чём отличие музыки от шума, поговорим о звуках полезных и вредных, об опасности «неслышных» звуков; выясним, можно ли сделать голос красивее и в чём тайна целительного воздействия музыки на человека. Вы узнаете также об особенностях слухового восприятия и о причинах преждевременного его повреждения.

Во второй части речь пойдёт об источниках света. Какие опасности для здоровья таят в себе такие, казалось бы, безобидные устройства, как осветительные приборы? Как их грамотно выбирать? Чтобы разобраться в этом, мы предварительно вооружимся всеми необходимыми сведениями о свете и о нашей зрительной системе.

Третья часть книги посвящена электромагнитной обстановке больших городов. Вы узнаете о нашей удивительной связи с естественными электромагнитными полями Земли, которые в современном мире почти полностью заглушены гораздо более сильными техногенными полями. Как это может отразиться на нашем здоровье и как минимизировать риски?

Наконец в четвёртой части мы поговорим о том, что такое радиация, где мы можем «схватить дозу», чего надо бояться, а чего нет. Мы постараемся разобраться с физическими основами всех этих явлений,

чтобы вы могли осознанно выстраивать свой быт в современных условиях.

Автор книги более тридцати лет преподаёт физику самым разным слушателям – как физикам, так и не физикам, а также читает научно-популярные лекции. Автор надеется, что изложенный материал будет понятен и интересен любознательному читателю, который хоть «краешком уха» прослушал курс физики в школе или только знакомится с этой замечательной наукой. Студенты-физики и учителя также найдут в книге что-то полезное для себя.

# ЧАСТЬ 1.

## МИР ЗВУКОВ

*Мы погружены в звуковую атмосферу: голоса природы, городские шумы, речь, музыка. Что такое звуки, как они рождаются и почему такие разные: высокие и низкие, приятные и неприятные, иногда шумы, а иногда музыка? Какая может быть польза от звуков для нашего здоровья и самочувствия и могут ли они приносить вред? Постепенно мы ответим на все эти вопросы. Природу звука и проблемы, связанные с его возникновением, распространением и восприятием человеком, изучает раздел физики – акустика. Сначала мы немного поговорим о физике: как звуковые волны возникают, распространяются и воспринимаются человеком, а затем обсудим их влияние на самочувствие и здоровье.*

# ГЛАВА 1.

## ФИЗИКА ЗВУКОВ

### ЧТО ТАКОЕ ЗВУК?

Мы слышим звук, когда что-то заставляет вибрировать, то есть колебаться, барабанные перепонки в наших ушах. Причём частота вибрации должна лежать в определённых пределах: не менее 16 колебаний в секунду (то есть 16 герц) и не более 20 тысяч колебаний в секунду (20 тысяч герц). Эту область частот называют звуковым диапазоном. Колебания барабанной перепонки с частотой менее 16 герц и более 20 тысяч герц мы не воспринимаем как звук, то есть не слышим. Сразу оговоримся: таков звуковой диапазон для молодых людей. Но уже с 15–20 лет этот диапазон начинает заметно сужаться, особенно со стороны высоких частот. Так что к 35 годам люди перестают слышать звуки с частотой более 15 тысяч герц, а к 50 годам верхний предел снижается, как правило, до 12 тысяч герц (у многих мужчин даже до 6–7 тысяч герц). Причём для того, чтобы предельно низкие и предельно высокие звуки были услышаны, они должны быть очень сильными, то есть вызывающими гораздо более интенсивные колебания барабанных перепонки, чем звуки середины звукового диапазона.

**Колебания — это периодически повторяющиеся движения, они характеризуются частотой — числом колебаний в секунду. Частота измеряется в герцах (сокращённо Гц):  
1 Гц — это одно колебание в секунду.**

Одни звуки мы воспринимаем как низкие (басовые), другие — как высокие, тонкие. Музыканты называют это высотой тона. Именно частота колебаний определяет высоту тона: большая частота создаёт ощущение высокого звука, малая частота — низкого.

Итак, ощущение звука связано с вибрацией барабанных перепонки. Но что её вызывает? Обычно нас окружает воздух. Вибрации воздуха, его периодические сгущения и разрежения — вот что заставляет так же периодически двигаться наши барабанные перепонки. А что порождает

ет вибрации воздуха? Периодические или непериодические изменения плотности окружающей среды создаёт источник звука.

Этим источником может быть любое тело: можно ущипнуть струну или провести по ней смычком, постучать по чему-нибудь, поскрести, потрясти... Нужно, чтобы поверхность тела-источника начала колебаться, колыхаться, дрожать. Положите ладонь на горло во время пения или потрогайте крышку звучащего рояля, и вы почувствуете вибрацию.

Вибрирующая поверхность источника изменяет плотность прилегающего слоя окружающей среды: воздуха или воды, а иногда и твёрдого тела (копыта коня стучат по земле). Все эти среды — газообразная, жидкая, твёрдая — являются упругими, то есть изменения плотности и давления, возникшие в одном месте, передаются от слоя к слою, распространяясь всё дальше от источника, подобно кругам на воде от брошенного камня. Такая передача объясняется взаимодействием молекул среды друг с другом. В газе это взаимодействие сводится к столкновениям молекул: молекулы из места уплотнения расталкивают молекулы в прилегающих слоях, заставляя их так же толкать своих соседей. В итоге колебания плотности и давления передаются от слоя к слою с определённой скоростью — скоростью звука. В газах эта скорость составляет сотни метров в секунду (в воздухе при комнатной температуре она равна 340 м/с). Обратите внимание: при распространении звуковой волны сами массы воздуха не перемещаются, каждая частичка среды лишь колеблется туда-сюда и заставляет это делать соседние частицы.

В жидких и твёрдых средах молекулы «чувствуют» друг друга на расстоянии электрическими полями: стоит одному слою молекул чуть сместиться от своего положения равновесия, как соседние молекулы почувствуют это и тоже придут в движение — начнут колебаться около своих равновесных положений, воздействуя в свою очередь на следующие слои. Поэтому звуковые волны в плотных средах распространяются быстрее, чем в газах. Так, в воде скорость звука около 1,5 км/с, а в твёрдых телах и того больше.

**Звуковая волна — это процесс распространения колебаний плотности и давления в упругой среде (воздухе, воде и любом твёрдом веществе).**

И вот звуковая волна доходит до барабанной перепонки уха, вызывая её движения. От перепонки колебания через систему слуховых косточек передаются улитке внутреннего уха (мы ещё поговорим о ней в своё время), а от неё уже в виде электрических импульсов по слуховому нерву поступают в нужную зону мозга, который обрабатывает полученный сигнал. И мы слышим звук. Так что звук — явление не только физическое, но и физиологическое.

**Ощущение звука возникает в результате воздействия колебаний давления воздуха (или воды, если человек находится в воде) на барабанную перепонку уха.**

Итак, чтобы мы услышали звук, необходимы три составляющие:

1. Источник звука, создающий периодические или непериодические изменения плотности частиц окружающей среды.
2. Упругая среда, которая передаёт возникшие в ней уплотнения во все стороны.
3. Приёмник звука (барабанные перепонки и весь наш слуховой аппарат). Добавим сюда и мозг, обрабатывающий сигналы от звуковых нервов.

## **НЕСЛЫШНЫЕ ЗВУКИ**

Звуковые волны с частотой менее 16 Гц называют инфразвуком, а с частотой более 20 000 Гц — ультразвуком. Мы не воспринимаем такие колебания барабанной перепонки как звук, но значит ли это, что мы совсем их не чувствуем?

Исследования инфразвука начались в середине прошлого века. Инфразвук появляется при землетрясениях, цунами, ударах грома, вибрациях тяжелых станков, рёве реактивных двигателей. Он присутствует и в рок-музыке, особенно в тяжёлом роке и на «живых» концертах. Инфразвуковые волны проходят сквозь любые преграды и распространяются на огромные расстояния.

У многих морских животных развита чувствительность к инфразвуку, благодаря которой они узнают о приближении шторма. Некоторые виды наземных животных (в том числе кошки) изменяют своё поведение перед землетрясением. Что позволяет им чувствовать его

приближение? Малые колебания грунта, увеличение статического электричества, воздействие инфразвуковых волн? Точно неизвестно. Возможно, все факторы вместе. А тигры, слоны, аллигаторы просто слышат инфразвук и даже могут общаться с его помощью!

Хотя человеку и большинству животных инфразвук и не слышен, он всё же действует на внутренние органы и системы организма и вызывает чувство тревоги. Этот эффект пытались использовать в фильмах ужасов, но потом запретили, так как инфразвук может привести к неконтролируемой панике среди зрителей. При большой интенсивности инфразвук ощущается как вибрация в теле, вызывая недомогания (тошноту, головокружение, вялость) и даже чувство острой боли. Наиболее негативное влияние инфразвук оказывает на нервную систему и работу сердца. Есть предположение, что инфразвук, возникающий от шторма в океане, увеличивает число автокатастроф и сердечных заболеваний на расстояниях в тысячи километров!

**Инфразвук при длительном воздействии вызывает состояние усталости. Присутствием инфразвука в шумах автострад и рёве взлетающих самолётов может объясняться синдром усталости у живущих поблизости людей.**

Ультразвук имеет частоты, превышающие верхний порог звукового диапазона, то есть выше 20 тысяч (а для пожилых людей — выше 12 тысяч) герц.

Многие животные могут воспринимать ультразвук, например кошки, собаки, кузнечики, летучие мыши, бабочки. Дельфины и другие морские животные для поисков косяков рыб, для ориентировки в мутной воде используют ультразвуковую локацию, то есть посылают ультразвуковой сигнал, а затем ловят сигнал, отражённый от препятствия. По времени запаздывания отраженного сигнала они судят о расстоянии до препятствия, а по изменению частоты сигнала — о скорости движения этого препятствия (этот же принцип применяют «гаишники» для определения скорости вашего автомобиля). Почему дельфины предпочитают зрению ультразвуковую локацию? Потому что свет в воде довольно сильно поглощается (радиус видимости составляет

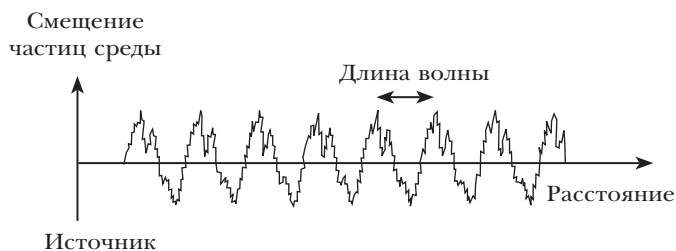
несколько метров), а ультразвук с частотой 50 тысяч герц распространяется на несколько километров! Летучие мыши и другие ночные животные благодаря ультразвуковой локации ориентируются при ночном полёте. В медицине тоже широко применяется ультразвуковая локация — это знакомая вам процедура УЗИ.

## КАК ИЗМЕРЯЮТ ВОЛНЫ

Поговорим немного подробнее о волнах. Это пригодится нам не только в связи со звуком, но и при разговоре об электромагнитном излучении и свете.

Чтобы нагляднее представить себе звуковую волну, воспользуемся аналогией. Характер движения частиц среды в бегущей волне напоминает работу «семафорного телеграфа», применявшегося в конце XVIII — начале XIX века. Между городами в области прямой видимости возводили специальные башни с мачтами. К концу мачты прикреплялись подвижные линейки, которые могли принимать различные положения, изображая таким образом все буквы и даже некоторые слова. Работник на каждой башне наблюдал за соседней башней в подзорную трубу и воспроизводил на своей мачте те же самые движения линеек, которые совершал его предшественник, но с небольшой задержкой во времени. И так сигнал «бежал» от башни к башне. От Парижа до Бреста депеша передавалась всего за 7 минут! Так и в бегущей звуковой волне частицы в каждой точке среды повторяют те же самые движения, которые совершают частицы «на первой башне», то есть движения источника звука, но с некоторым запаздыванием, время которого определяется расстоянием до источника и скоростью волны.

Если движения источника звука периодические, то такими же будут и движения частиц среды, причём частицы, находящиеся на определённом расстоянии друг от друга (в направлении распространения волны), будут совершать синхронные движения. Такое минимальное расстояние называется длиной волны. Если в какой-то момент времени мы сделаем «мгновенную фотографию» распределения смещений частиц от своих равновесных положений, то увидим повторяющуюся картину (рис.1).



*Рис. 1. Пример графика зависимости смещений частиц среды от своих равновесных положений в один и тот же момент времени в зависимости от расстояния до источника звука*

Итак, длина волны — это минимальное расстояние между частицами среды, колеблющимися синхронно. Длина волны связана с частотой колебаний: чем больше частота, тем меньше в данной среде длина волны. Запомним это!

**Длина волны  $\lambda$  равна расстоянию, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний  $T$ . Если  $v$  — скорость распространения волны, то  $\lambda = v \cdot T$ . Частота колебаний  $f$  — это величина, обратная периоду:  $f = 1/T$ , поэтому  $\lambda = v/f$ .**

**Чем больше скорость волны и чем больше период колебаний (то есть меньше частота), тем больше длина волны. Эта формула справедлива для любых волн, как звуковых, так и электромагнитных. Мы ещё не раз её вспомним.**

Инфразвуковые низкочастотные волны самые длинные: в воздухе более 20 м и могут достигать сотен метров. Длины волн для ультразвука, наоборот, очень малы: в воздухе менее 15 мм. При ультразвуковой диагностике в медицине применяют волны длиной в доли миллиметра — именно такие короткие волны позволяют заметить в тканях организма неоднородности малого размера (ведь волны любой природы не замечают преград, размер которых гораздо меньше длины волны — так, океанская волна «не заметит» маленький камушек на своём пути).

Столь же короткие ультразвуковые волны используют летучие мыши для локации. Ну а для звукового диапазона длины волн в воздухе простираются от 15 мм до 20 метров.

**Обратите внимание:** длина волны изменяется при переходе волны из одной среды в другую. Так, в воде или другой среде все длины волн уменьшаются во столько же раз, во сколько раз увеличивается скорость звука (в воде — в 4,4 раза). Частота же колебаний частиц в волне — это её неизменяющаяся характеристика. Поэтому физики предпочитают характеризовать волну именно частотой колебаний частиц.

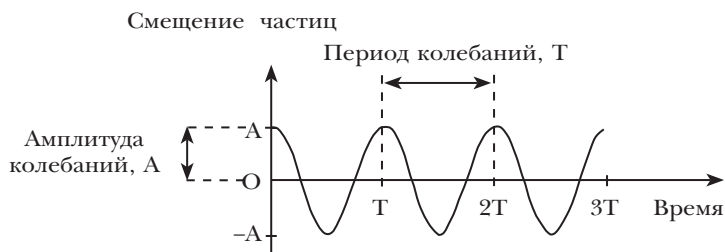


Рис. 2. Смещение частицы среды как функция времени в гармонической волне

Ещё одна важная характеристика волны — её интенсивность. Она определяется амплитудой («размахом») колебаний частиц в волне и связана с громкостью воспринимаемого звука (позже поговорим об этом подробнее).

Наконец, очень важна форма колебаний. Мы имеем в виду форму графика, изображающего зависимость смещения частиц среды в фиксированном месте от времени. Такая же форма повторится на «мгновенной фотографии» распределения смещений частиц среды вдоль направления распространения волны (рис. 1). Наиболее простая форма колебаний — синусоидальная (рис. 2). Волны с такой формой колебаний называют гармоническими. Они имеют очень большое значение в акустике и вообще в физике. Вскоре мы узнаем почему.

## СЕКРЕТЫ МУЗЫКАЛЬНЫХ ЗВУКОВ

Внимание! Сейчас мы откроем тайну музыкальных и немusикальных звуков. Итак: любые периодические колебания источника рождают музыкальный звук, а непериодические – немusикальный.

Музыкальный звук мы можем пропеть, немusикальный – не можем. У музыкальных звуков мы различаем высоту тона (то есть отождествляем звук с определённой нотой музыкального строя), у немusикальных – нет. К примеру, пение птиц красиво, но записать его нотами и воспроизвести голосом или на музыкальном инструменте не получается (разве что «ку-ку» можно спеть вполне узнаваемо).

Ещё у музыкальных звуков есть тембр – «звуковой окрас», позволяющий отличить ноту «до», взятую на рояле, от такой же ноты, взятой на другом инструменте.

Где же в форме колебаний спрятаны все эти особенности музыкального звука? И как можно классифицировать многообразие всевозможных форм колебаний, чтобы можно было «подделывать» (синтезировать) нужные звуки или сделать программы их распознавания?



Рис. 3. Пример разложения периодического колебания (кривая 3) на гармоники (кривые 1 и 2)

Оказывается, любое периодическое движение чисто математически может быть представлено как сумма гармонических колебаний с кратными частотами, то есть с частотами, полученными умножением некоторой основной частоты  $f_0$  на целые числа: 2, 3, 4... (это известная математикам теорема Фурье). Наименьшая частота этого ряда ( $f_0$ ) называется основной, а колебание с этой частотой – основным колебанием или пер-

вой гармоникой. Основная частота определяется периодом исходного движения. Колебания с кратными частотами  $2f_0$ ,  $3f_0$ ,  $4f_0$ ... называют гармоническими обертонами или просто гармониками (второй, третьей, четвёртой и так далее до бесконечности). Многообразие сочетаний различных амплитуд (и фаз) гармоник обеспечивает все возможные формы результирующего колебания.

Процедура выделения простых гармоник из сложного колебания называется спектральным (или гармоническим) анализом. На рисунке 3 приведён пример разложения колебания на гармоники (в данном примере понадобилось всего две гармоники с частотами  $f_0$  и  $2f_0$ ). Такой анализ можно произвести математически, а можно разложить звук на гармоники с помощью прибора – спектроанализатора.

Нарисуем график, состоящий из вертикальных отрезков: высоты отрезков соответствуют амплитудам гармоник, их положение на горизонтальной оси – частотам. Такая картинка изображает спектр колебания (спектр звука). Итак, спектр звука показывает, гармоники (обертоны) каких частот и с какими амплитудами присутствуют в данном звуке.

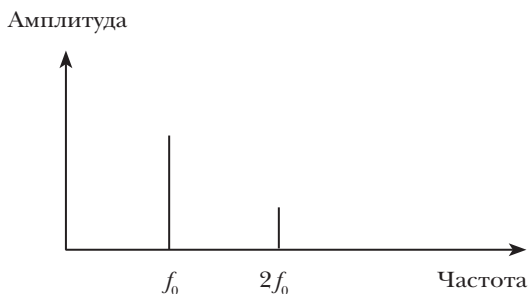


Рис. 4. Спектр колебания, представленного на рис. 3

Основная частота определяет высоту тона, а все остальные (высшие) гармоники создают неповторимый тембр звука.

**Основная частота для самого низкого мужского голоса (бас) составляет 80 Гц. Основная частота для самого высокого женского голоса (сопрано) достигает 1050 Гц. Обертоны же могут простираются до частот порядка 50 тысяч герц, выходя за пределы частотного диапазона слухового восприятия.**

**Основная частота звуков, издаваемых музыкальными инструментами, лежит в диапазоне 40–5000 Гц.  
Нота «ля» первой октавы имеет частоту 440 Гц.**

Как правило, первая гармоника (основная частота) присутствует в музыкальном звуке с наибольшей амплитудой. Но это не обязательно так. В спектре флейты, фагота, корнета и трубы некоторые высшие гармоники столь же сильны, как и основная частота, или даже сильнее. Но ухо не проведёшь! Оно безошибочно распознаёт основную частоту, даже если её вовсе нет в спектре, а присутствуют лишь гармоники  $2f_0$ ,  $3f_0$ ,  $4f_0$ , ... Так, например, музыкальный звук, состоящий из набора частот 200, 300, 400 и 500 Гц, воспринимается как звук высотой 100 Гц, хотя этой частоты нет в наборе. Другими словами, мы слышим отсутствующий звук! Это связано с особенностями человеческого уха, которое вносит свои искажения. Так, при возбуждении его двумя частотами  $f_1$  и  $f_2$  в нём возбуждаются также суммарная и разностная частоты  $f_1+f_2$  и  $f_1-f_2$  вместе со всеми их гармониками. Чем больше амплитуда исходных колебаний, тем больше слышны «лишние» частоты — их называют субъективными тонами. В нашем примере, когда в спектре объективно присутствуют частоты 200, 300, 400 и 500 Гц, но нет основного тона 100 Гц, в ухе возникают колебания разностных частот  $300-200=100$  (Гц),  $400-300=100$  (Гц) и т.д., то есть колебания отсутствующего основного тона. Для любого музыкального звука основная частота эффективно усиливается разностными частотами и обязательно будет опознана ухом.

Бесконечное разнообразие спектров музыкальных звуков, то есть сочетаний частот и амплитуд гармоник, объясняет разнообразие тембров звучания. В природе не существует «простых» звуков, тембрально не окрашенных (состоящих только из колебаний одного основного тона). Такой звук можно искусственно синтезировать, преобразовав электромагнитное колебание одной частоты в звуковое с помощью так называемого звукового генератора, причём ухо воспринимает этот звук как весьма противный. Более того, человеку труднее опознать высоту тона «чистого» звука, чем звука с тембральным окрасом, и мы уже поняли почему. Из инструментальных звуков наиболее «чистым», почти без примеси гармоник, является звук камертона.

Если в звуке много гармоник, то он воспринимается «богатым». Так, в спектре голоса хорошего оперного певца гораздо больше обертонов, чем в спектре любителя, поющего ту же арию. Но если в спектре слишком много гармоник, то звук кажется «грязным», а если там много верхних гармоник — то и резким, крикливым, неприятным.

**Тембр детских звучащих книжек очень бедный. Он «урезан» буквально до одной-двух гармоник. Такие книжки портят слух.**

Подумаем: почему низкие звуки на рояле звучат «богато» (рояль рокочет), а верхние звуки — «бедненько»? Ответ прост. Ухо немолодого человека не слышит гармоники с частотами выше 12–15 тысяч герц. Значит, высшие гармоники высоких звуков просто не воспринимаются. Верхние ноты рояля не виноваты, виноваты наши уши.

А чем можно объяснить пристрастие многих меломанов к громкой музыке? Легко сообразить, что она тембрально богаче: ведь для того, чтобы мы могли слышать высокие обертоны, они должны быть достаточно интенсивными (вспомним, что чувствительность уха быстро падает по мере приближения к границам звукового диапазона). Правда, увеличение громкости имеет смысл, только если вы используете качественную звуковую систему, не обрезающую высшие гармоники.

**Слушая современные реставрированные перезаписи голосов великих певцов прошлого, удивляешься: что же такого удивительного люди в них находили? А дело в том, что при реставрации вместе с шумами старой грамзаписи удаляются и многие обертоны — и голос лишается своего волшебства.**

## **ЧТО ЗА ШУМ, ЧТО ЗА РЁВ**

Непериодические движения рождают немзыкальные звуки и шумы. Некоторые немзыкальные звуки вполне красивы, например звон колоколов и пение птиц. А другие воспринимаются как шум и рёв. Почему?

Немузыкальный звук тоже имеет свой спектр, но этот спектр уже не является набором обертонов с частотами, кратными наименьшей

основной частоте. Он может содержать или «хаотичный» набор отдельных частот, или вообще все частоты в некотором диапазоне (такой спектр называют непрерывным).

Посмотрим, например, на спектр звука колокола. Хотя звон колокола похож на музыкальный звук, подобрать соответствующую ему ноту звукоряда сложно, и как ни пытались композиторы изобразить перезвон колоколов на рояле или с помощью оркестра, узнаваемым оставался скорее ритмический рисунок перезвона, нежели само звучание колоколов. А почему? Спектр звучания колокола представляет собой ряд обертонов, но их частоты не кратны наименьшей частоте. Воспринимаемая высота тона колокола определяется не наименьшей частотой, как для музыкальных звуков, а обертоном, доминирующим сразу после удара. Спустя некоторое время в звуке колокола начинают преобладать более низкие обертоны, и восприятие тона меняется. И если спектры всех роялей в основном похожи друг на друга, то спектры звуков колоколов совершенно индивидуальны.

Звуки с непрерывным спектром воспринимаются как шумы. Если полоса частот не слишком широка, мы можем грубо оценить высоту звука: рычание тигра – низкий звук (полоса низких частот), крик павлина – высокий. Если частоты более-менее равномерно распределены по всему звуковому диапазону, получается так называемый белый шум (пример: рёв близкого водопада).

Пение птиц ещё труднее передать звуками музыки, чем звучание колоколов, хотя шумом его тоже не назовёшь. С точки зрения спектра это нечто промежуточное между звоном колокола и шумом. Каждая «нота» птичьего пения содержит не ряд кратных частот, как музыкальный звук, и не набор отдельных обертонов, как звук колокола, а несколько узких непрерывных полос частот, причем эти полосы во время песни «ползут» вверх или вниз по шкале частот, совершают резкие взлёты и падения. Именно эти взлёты и падения при переводе птичьего пения на язык музыки композиторы имитируют скачками на те или иные интервалы.

**Частоты некоторых птичьих голосов простираются до 50 тысяч герц, уходя в область ультразвука, так что мы слышим лишь часть их песен.**

Очень короткие звуки (стук в дверь, хлопок в ладоши) также воспринимаются как немusикальные. Ведь нашему слуховому аппарату требуется некоторое время для определения периода колебаний и частоты основного тона, а при коротких звуках он просто не успевает это сделать. Спектры коротких звуков непрерывны, как и спектры шумов. Если ширина полосы частот невелика, мы можем приблизительно определить высоту тона, особенно в сравнении с другими подобными звуками. Вспомните, например, детский деревянный ксилофон, состоящий из дощечек разной длины. Удар по одной дощечке воспринимается просто как стук (немusикальный звук), но ударяя по ряду дощечек-клавиш, мы уже слышим гамму.

## **КАК СОЗДАТЬ МУЗЫКАЛЬНЫЙ ЗВУК?**

Одни предметы издают музыкальные звуки, а другие — немusикальные. Самый простой, известный с древних времён источник музыкальных звуков — натянутая струна. Именно с изучения звучания струн началась математическая теория музыки, и основы её заложил в Древней Греции Пифагор (570–490 гг. до н.э.).

Самые простые движения, которые могут совершать точки струны, изображены схематически на рисунке 5: каждая точка движется туда-сюда, словно маятник, в результате струна изгибается так, что её форма соответствует части синусоиды. Длина полного периода такой синусоиды равна длине волны. Если оба конца струны закреплены, то на длине струны укладывается целое число полуволен (на верхнем рисунке — одна полуволна, на среднем — две, на нижнем — три). Такие колебания струны называются стоячими волнами или собственными колебаниями. Частоты этих колебаний кратны друг другу. Если одной полуволне соответствует частота  $f_0$ , то частоты колебаний для более коротких волн равны  $2f_0$  и  $3f_0$ . Как вы понимаете, возможны также колебания с частотами  $4f_0$ ,  $5f_0$  и так далее. Частота  $f_0$  является основной, а все остальные — обертонами или высшими гармониками.

Самое интересное: если вы просто ущипнёте струну, то многие обертоны возбуждятся одновременно, и соответствующие им движения наложатся друг на друга, в результате форма струны в процессе колебаний будет уже не синусоидальной, а более сложной. Это как «спектральный анализ наоборот»: сложение простых гармоник даёт в результате сложное колебание.

Ущипнув струну, мы услышим музыкальный звук, высота тона которого соответствует основной частоте  $f_0$ , а наличие обертонов придаст звуку тембральный окрас. Щипая струну в разных местах, мы меняем амплитуды обертонов и, значит, меняем тембр. Например, щипок ровно посередине струны исключает из движений чётные гармоники  $2f_0$ ,  $4f_0$  и т.д., так как для этих гармоник средняя точка струны должна быть неподвижна.

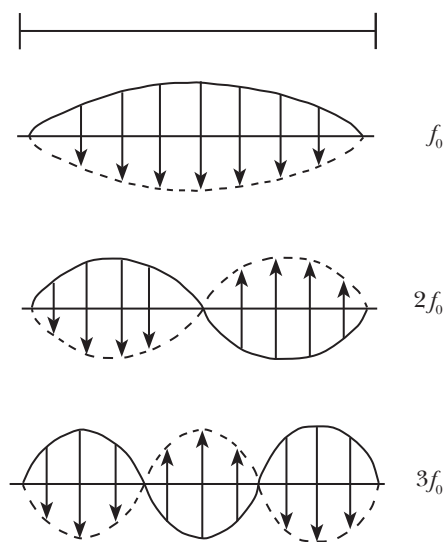


Рис. 5. Простейшие колебания струны (первая, вторая и третья гармоники)

Какими параметрами струны определяется её основная частота? Как видно из рисунка 5, чем длиннее струна, тем больше длина волны первой гармоники, а значит, частота колебаний меньше (низким звукам рояля соответствуют самые длинные струны, высоким – самые короткие). Основная частота  $f_0$  зависит также от натяжения струны: увеличи-

вая натяжение, мы увеличиваем основную частоту (именно путём изменения натяжения струн настройщик добивается нужной частоты звука).

**Как и для бегущих волн, длина стоячей волны  $l$  связана с частотой колебаний частиц и скоростью  $v$  распространения волны универсальной формулой  $\lambda = v/f$ . Длина волны первой (основной) гармоники, как видно из рисунка 5, в два раза больше длины  $l$  струны:  $l = 2\lambda$ . Так что основная частота струны  $f_0 = v/\lambda = v/2l$ . Увеличение натяжения струны приводит к увеличению скорости волн  $v$ , а значит, и к увеличению основной частоты.**

Ещё одним простым телом, рождающим музыкальные звуки, являются цилиндрические трубы, ширина которых гораздо меньше длины (вспомним, например, трубы органа). Главным звучащим телом в трубах является наполняющий их воздух. Возбуждая на одном конце трубы движение воздуха с помощью вибратора, мы приводим в колебательное движение весь столб воздуха в трубе, и он рождает звуковую волну, бегущую от трубы к вашему уху. Основная частота  $f_0$  определяется длиной воздушного столба: чем длиннее труба, тем ниже её звук, как и для струны. И также наряду с основной частотой возбуждаются обертоны с кратными частотами.

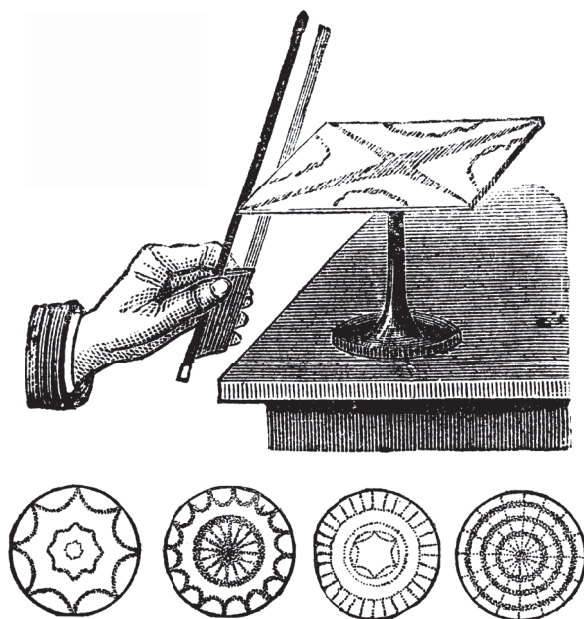
Струны и воздушные трубы – основа всех музыкальных инструментов. Именно они рожают музыкальные звуки. Предметы же более сложных форм являются источниками немusикальных звуков.

## **МОЖНО ЛИ УВИДЕТЬ ЗВУК?**

Любой твёрдый предмет будет издавать те или иные звуки, если по нему ударять или, к примеру, водить по нему смычком. И у любого предмета конечных размеров, как и у струн, есть характерный набор собственных колебаний – возможных простейших движений его частиц. У большинства объемных тел частоты собственных колебаний образуют непрерывный спектр в пределах определённой полосы частот, зачастую весьма широкой, то есть воспринимаются ухом как шум. Например, ударив по столу, вы слышите звук, создаваемый возникающими колебаниями стола, но высоту тона определить не може-

те. Можно только предсказать, что шум от удара по массивному шкафу будет более низкочастотным, чем от удара по небольшому столику.

Немецкий физик и музыкант Эрнест Хладни сумел сделать видимыми собственные колебания плоских пластин разной формы (круглых, квадратных и прочих). Для этого он возбуждал в них колебания с помощью скрипичного смычка (рис. 6). При этом пластины издавали немзыкальные звуки разной степени «противности». На поверхность пластин он насыпал мелкий песок, который слетал с активно колеблющихся областей и концентрировался в тех местах, которые оставались практически неподвижными. Проводя смычком по краю пластины в разных местах, под разными углами и с различной скоростью, можно возбуждать различные собственные колебания и получать самые разные картины: иногда простые, иногда сложные, иногда красивые, иногда беспорядочные. Каждому типу колебаний соответствуют определённая «песочная картина» и своё неповторимое звучание.



*Рис. 6. Примеры фигур Хладни, полученных с помощью насыпанного на поверхность колеблющихся пластин песка*

## РЕЗОНАНС И РЕЗОНАТОРЫ

Но вернёмся к музыкальным звукам и струнам. Остаётся вопрос: почему тембры разных струнных инструментов (рояля, скрипки, виолончели и прочих) столь отличаются друг от друга, хотя струны везде практически одинаковые? Всё дело в резонаторах. Давайте разберёмся, что это такое.

До сих пор мы говорили о собственных колебаниях тел — таких колебаниях, которые они совершают «по своему сценарию», стоит только вывести их из равновесия, сообщив запас энергии (ущипнуть струну, постучать по столу, ударить по металлической пластинке, провести смычком и т.д.). Как мы уже знаем, собственные колебания происходят с собственными частотами — с любой из них или одновременно со многими. А что будет, если мы будем извне «навязывать» упругому телу колебания с какой-то частотой? Возникнут колебания, которые называют вынужденными.

Попробуйте закрепить один конец длинного шнура (желательно эластичного), а другой конец периодически раскачивать рукой. По шнуру побежит какая-то рябь. Но постарайтесь подобрать такую частоту качаний, чтобы на длине шнура уложилась одна или несколько полуволн (как на рисунке 5) — шнур отзовется колебанием значительной амплитуды. Мы наблюдаем при этом явление резонанса — резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынуждающего периодического воздействия с любой из собственных частот.

Говорят, что Карузо мог разбить бокал голосом, взяв ноту надлежащей высоты. В середине XIX века во Франции рухнул мост, по которому проходил отряд солдат. В Петербурге в XIX веке таким же образом обрушился Египетский мост (с тех пор солдатам запрещено ходить по мостам в ногу). Это всё примеры проявления резонанса.

**Слово «резонанс» происходит от французского *resonance* — звучать, откликаться.**

Резонанс может возникнуть только там, где возможны колебания. Колебаться (а значит, и резонировать) могут твердые тела (металл,

дерево и прочие), жидкие (вода в сосуде), газообразные (воздух в трубе).

Явление резонанса используют, чтобы усиливать звучание тех или иных частот и формировать нужный тембр музыкального инструмента.

Как сделать резонатор – устройство, которое «откликается» на колебания, близкие к его собственной частоте (любой из них)? Очень просто: берём любой полый предмет, наполненный воздухом и сообщающийся с атмосферой одним или несколькими отверстиями, – это и есть резонатор. Главным резонирующим телом является именно воздух внутри полого предмета, хотя и стенки тоже дают свой вклад. Узнаёте в этом описании корпус скрипки, гитары?

Если у вас есть камертон, вы легко убедитесь, что он звучит заметно громче, когда поставишь его ножкой на стол. И звук смартфона будет громче, если вы положите его на твёрдую поверхность стола. Стол играет в этих случаях роль резонатора. Из-за сложной формы стола его собственные частоты образуют широкий непрерывный спектр, так что он с готовностью откликается на любую частоту. Хотя отклик этот будет и не слишком сильным, но всё же благодаря своей большой площади поверхности стол породит более интенсивную звуковую волну в воздухе, чем маленькие ножки камертона или мембрана динамика смартфона.

Резонанс и резонаторы в музыке играют огромную роль. Сама по себе струна звучит едва слышно, потому что площадь её соприкосновения с воздухом очень мала и в колебательное движение вовлекается мало частиц окружающего воздуха. Только в соединении с резонатором струны приобретают надлежащую звучность.

Если резонатор сильно откликается на очень узкий диапазон частот, то это, как говорят физики, добротный резонатор. Примером добротного резонатора может служить длинный полый ящик или труба с одним или двумя открытыми торцами – он будет резонировать только на избранные частоты, а на остальные не реагировать. Но такие резонаторы не годятся для музыкальных инструментов! Все резонаторы музыкальных инструментов «плохие», то есть обладают низкой добротностью: они усиливают звук на всех частотах, но понемнож-

ку. Добротные резонаторы были бы для музыкальных инструментов сплошным бедствием: ведь они усиливали бы только звуки избранных резонансных частот.

## ТАЙНЫ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Голос каждой скрипки, каждого инструмента индивидуален, как и голос каждого человека. Но всё же вы отличаете звучание любой скрипки (и грубой школьной, и шедевра Страдивари) от звучания любой виолончели, флейты или кларнета. По каким признакам вы это делаете?

Секрет спрятан в особой и неповторимой форме резонаторов. Эти формы совершенствовались столетиями в руках мастеров. Хотя резонаторы музыкальных инструментов усиливают звуки любой частоты, но на некоторые полосы частот они откликаются особенно охотно. Области частот, которые усиливаются резонаторами данного вида инструментов лучше остальных частот, называют формантами этого инструмента. Независимо от частоты основного тона, сильнее будут звучать те обертоны, которые попадают в область формант. Форманты всех скрипок одни и те же, как и форманты всех флейт. Так, благодаря избирательному усилению обертонов создаётся характерный узнаваемый тембр инструмента.

**Резонатором рояля служит большая дека, на которой крепятся струны. Большая площадь деки позволяет добиваться большой мощности излучения звуковых волн в окружающее пространство, то есть производить громкий звук.**

**У скрипки и её «родственников» на звучание струн отзываются корпус и воздух в корпусе. Сложная форма корпуса создаёт необходимый набор формант. Прорези эфы нужны для того, чтобы звуковые колебания, усиленные в воздушном резонаторе, могли свободно выходить наружу.**

**У медных духовых инструментов форманты определяются растробом, из которого выходит звук.**

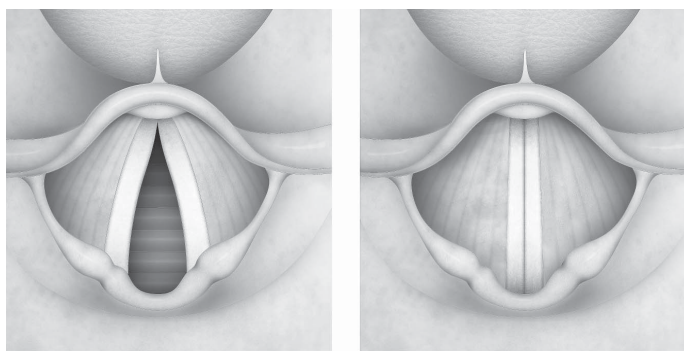
Индивидуальность же звучания каждой отдельной скрипки прячется в неповторимых деталях: породе и качестве дерева, его возрасте, тончайших нюансах формы деки, толщине дерева и составе лака, покрывающего поверхность инструмента... Как говорится, Бог — в дета-

лях. Изменение любой детали в архитектуре инструмента приводит к изменениям качества звука. Создавать новые «скрипки Страдивари» за 200 лет так и не научились, хотя с помощью компьютерной томографии и смогли воспроизвести все нюансы их форм.

Электронные синтезаторы могут имитировать звук музыкальных инструментов благодаря тому, что мы знаем характерные форманты того или иного инструмента. И всё же одного только тембра для «подделки» звуков музыки недостаточно. Дело в том, что звуки реальных инструментов не статичны, и тембр каждой взятой ноты меняется в процессе звучания. Наш слух чётко отслеживает фазу нарастания звука и фазу его постепенного спадания, все изменения тембра. Помимо гармоник, в звуках музыкальных инструментов присутствует и определённый шумовой фон (типа стука клавиш). По нюансам спектра и временной структуры звука мы способны отличить звучание реального инструмента от подделки.

## РОЖДЕНИЕ ЖИВОГО ГОЛОСА

Голосовой аппарат человека устроен подобно духовому музыкальному инструменту типа кларнета. Источником звука в кларнете являются колебания гибкой трости в воздушном потоке, а у человека — голосовых связок. Это небольшого размера мышечные складки, прикреплённые к внутренней стороне гортани. Голосовые связки достаточно гибкие и могут менять расстояние между своими краями в очень широких пределах (рис. 7).



*Рис. 7. Голосовые связки человека при дыхании (слева) и при звучании (справа)*

При дыхании они разведены в стороны, образуя треугольное отверстие, через которое свободно проходит воздух. Для порождения звука связки начинают вибрировать, периодически захлопываясь и размыкаясь.

Частоту основного тона колебаний голосовых связок, от которой зависит высота голоса, мы можем произвольно менять, регулируя их напряжение и скорость воздушного потока.

Интересно, что звук, порождаемый голосовыми связками, совсем не похож на звуки живого голоса, — вы никогда не догадались бы, что это голос человека. Человеческий тембр наш голос приобретает благодаря системе резонаторов. Дело в том, что сверху и снизу к гортани примыкают трубообразные полости, составляющие с ней единое целое. Пазухи носа, полость ротоглотки, глотка и гортань — это головные резонаторы. Кости черепа, подобно корпусу скрипки, тоже принимают участие в усилении звука. Ниже голосовых связок, рядом с бронхами и лёгкими, расположены кости трубчатой структуры, которые, получая энергию от звуковой волны, начинают вибрировать, усиливая звук, — этот процесс принято называть грудным резонированием. Оно ощущается как вибрация в груди. Головное же резонирование ощущается как вибрация в голове.

**Каждый из нас хотел бы иметь приятный «грудной голос», более тёплый и чувственный, сочный и бархатистый, чем голос при головном резонировании. «Вытащить» грудной голос вполне возможно! Для этого разработаны специальные упражнения. Вы легко найдёте их описание на Ютуб-канале.**

Воздух в каждом из резонаторов имеет свои собственные частоты, зависящие от их размера и формы. Эти частоты мы можем в той или иной степени менять, изменяя форму и размеры резонансных полостей с помощью движения языка и губ.

Первоначальный звук связок состоит из 20–30 гармонических обертонов, интенсивность которых слегка уменьшается с ростом частоты. Каждый из резонаторов усиливает обертоны с частотами, близкими к основной частоте резонатора, и гасит обертоны с далёкими частота-

ми. И в спектре голоса остаётся всего несколько гармоник различной интенсивности, которые и определяют его тембр.

Если воздух в резонаторах заменить другим газом, то их собственные частоты изменятся. Пробовали вдохнуть содержимое шарика, надутого гелием, а потом заговорить? Получается «голос Буратино». Дело в том, что скорость звука в гелии больше, чем в воздухе, поэтому собственные частоты заполненных гелием резонаторов увеличились, так что резонаторы стали усиливать обертоны более высокой частоты.

## О ПЕВЧЕСКИХ ГОЛОСАХ

Стоит человеку запеть, как наш слух легко выделяет тех, кто имеет певческий голос, даже если это не профессиональный певец. Что же такое особенное содержится в певческих голосах? Почему не каждый, кто умеет петь «чистенько», музыкально, может стать певцом? Умение петь громко и охватывать широкий диапазон частот, безусловно, имеет значение, но этого недостаточно!

Оказывается, в спектре певческих голосов усилены обертоны, попадающие в две особые области частот, — их называют певческими формантами. Нижняя певческая форманта расположена в районе частоты 500 Гц и придаёт голосу мягкость и «округлость». Верхняя певческая форманта с частотой в районе 3000 Гц (у мужчин чуть ниже, у женщин чуть выше) придаёт голосу «полётность», «металличность» и «блеск». Удивительно, но двадцатая или тридцатая гармоника, попадающая в область верхней певческой форманты, может превосходить по интенсивности все остальные гармоники спектра! Певец способен управлять интенсивностью верхней певческой форманты, то есть блеском своего голоса.

Эти певческие форманты должны присутствовать у любого певца — от баса до сопрано. Голос может обладать этими качествами от природы или же быть профессионально обработанным. Ухо профессионала сразу распознаёт наличие или отсутствие певческих формант у певца, а для непрофессионалов — это просто волшебство голоса.

Современные усилители позволяют исправить недостатки тембра певца путём специальной избирательной настройки частотной харак-

теристики тракта усилителя. Например, можно «вытянуть» обертоны в области певческих формант и придать голосу певца недостающий блеск. Эстрадные солисты всюю используют подобные системы индивидуальной настройки усилителей.

## ТАЙНЫ РЕЧИ

Как мы на слух отличаем один звук речи от другого? Разберёмся в этом на примере гласных, которые делятся подобно музыкальным звукам и у которых имеется основная частота, то есть высота тона (с согласными всё несколько сложнее).

Мы различаем гласные, даже произнесённые на одной высоте, по их спектру. Каждый гласный звук (А, О, У...), подобно каждому виду музыкальных инструментов, имеет свои характерные области частот — форманты гласных. Когда мы произносим гласную, все обертоны голоса, попавшие в область формант этой гласной, усиливаются. Форманты гласных остаются неизменными, когда высота основного тона меняется. Положение формант каждого гласного одинаково для всех людей, независимо от индивидуальных особенностей их тембров. По этим-то формантам наше ухо и опознаёт гласные, подобно тому как по характерным формантам музыкальных инструментов ухо отличает скрипку от флейты.

У каждого гласного звука есть две основные форманты, причём одна из них связана с резонированием в глотке, а вторая — в ротовой полости (у некоторых гласных имеется ещё несколько добавочных формант). Например, форманты гласной «У» расположены в районе частот 300 и 650 Гц, форманты «А» — около 700 и 1000 Гц. Учась говорить, мы учимся изменять собственные частоты своих ротоглоточных резонаторов, перемещая язык и губы.

Все основные форманты гласных попадают в диапазоне частот от 200 до 4000 Гц. Эта частотная область совершенно необходима нам для распознавания речи. Если по каким-то причинам ослабнет или исчезнет какая-то из формант (например, при плохом качестве радиосвязи или при некоторых формах тугоухости, когда нарушено восприятие высоких частот), то становится трудно разобрать, что говорит человек. Замечали, что старые люди иногда с трудом воспринимают вашу речь по телефону, но понимают её при личном общении?

Когда хороший певец не просто произносит, а поёт гласный звук, то помимо формант данного гласного в спектре звука будут присутствовать также универсальные певческие форманты.

## ГЛАВА 2. ВОСПРИЯТИЕ ЗВУКОВ

В первой главе мы уже немного говорили о том, как человек слышит. Далее мы подробнее остановимся на особенностях восприятия различных по частоте и громкости звуков.

### ОБЛАСТЬ СЛЫШИМОСТИ

Звуковая волна, достигая барабанной перепонки, заставляет её колебаться, передавая ей необходимую для этого энергию. Чем больше приносимая энергия, тем сильнее эти колебания. В физике для измерения энергии, переносимой волной, используют понятие «интенсивность волны»: она показывает, какая энергия приносится волной на единицу площади приёмника за одну секунду и измеряется в ваттах на квадратный метр ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ). Самая слабая интенсивность звуковой волны, которая ещё вызывает слуховые ощущения, называется порогом слышимости. Для разных частот порог слышимости различен.

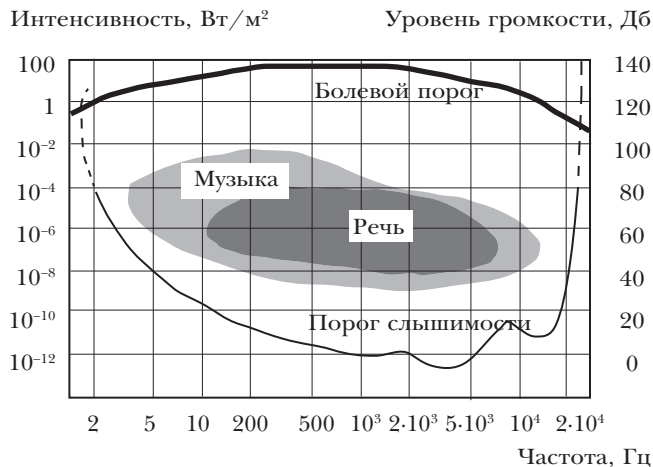


Рис. 8. Область слышимости. По горизонтальной оси отложены частоты в герцах (шкала неравномерная!), слева по вертикали – интенсивность (шкала тоже неравномерная), справа – уровни громкости в децибелах

Так, на частотах 1000–2000 Гц порог слышимости составляет одну тысячную от одной миллиардной доли ватта на квадратный метр ( $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>). Представьте себе: амплитуда колебаний частиц воздуха при такой интенсивности звуковой волны в сто тысяч раз меньше размера пылинки! Такая чувствительность уха находится на пределе биологической целесообразности: будь она ещё немного меньше, и мы бы слышали постоянный шум в ушах от тока крови. А максимальная интенсивность звука, которая граничит уже с болевым порогом, в тысячу миллиардов раз больше и составляет 1 Вт/м<sup>2</sup>. Это колоссальный диапазон! В этом смысле человеческое ухо уникально. Оно является намного более совершенным устройством, чем любой из измерительных приборов: обычно они воспринимают интенсивности, отличающиеся не более чем в 100 раз.

Но по мере приближения к пограничным частотам звукового диапазона наша чувствительность к звукам быстро падает, то есть порог слышимости быстро растёт. Болевой же порог меняется не столь сильно. На нижней и верхней границах звукового диапазона порог слышимости и болевой порог сливаются: чтобы услышать звук частотой 20 герц или 20 тысяч герц, требуется интенсивность, граничащая с болью. На рисунке 8 изображены кривые порога слышимости и болевого порога в зависимости от частоты. Пространство на графике между этими кривыми соответствует области слышимости. (Напомню, что с возрастом область слышимости сильно сокращается, особенно со стороны высоких частот.) Внутри области слышимости на рисунке указаны области частот и интенсивностей, соответствующие речи и звучанию музыкальных инструментов.

Из рисунка 8 видно, что наибольшей чувствительностью мы обладаем к частотам от тысячи до пяти тысяч герц (это верхний регистр фортепиано, начиная с третьей октавы) — здесь пороговая кривая опускается ниже всего. Обратите также внимание на ещё большее снижение порога слышимости в районе 2,5–3 тысяч герц. Видите «ямку» на кривой порога слышимости? О её происхождении мы узнаем, когда поговорим об устройстве уха человека.

**Есть некая загадка в нашей повышенной чуткости к высоким частотам. Возможно, часть отгадки кроется в том, что в детском крике особо выделяются обертоны с частотами около трёх тысяч герц. Вероятно, природа постаралась, чтобы детский крик всегда был услышан на фоне помех. В этом же районе частот находится и верхняя певческая форманта, обеспечивающая «дальнобойность» голоса.**

## **КАК МЫ ВОСПРИНИМАЕМ ГРОМКОСТЬ**

Интенсивность звуковой волны, а также пропорциональное ей звуковое давление – это объективные характеристики звука. Они могут быть измерены приборами. Громкость – субъективная характеристика: она показывает, как звук воспринимается человеком.

Чем больше интенсивность, тем громче звук. Но связь между громкостью звука и интенсивностью не простая пропорциональная: субъективно оцениваемая громкость возрастает гораздо медленнее, чем интенсивность звуковой волны. Вы удивитесь, но, например, интенсивность звука при громкой речи в тысячу раз больше, чем при тихом разговоре (недаром мы гораздо сильнее устаём после чтения лекции, нежели после спокойной беседы). Другими словами, когда интенсивность увеличивается в десятки раз, нам кажется, что громкость возросла на сколько-то единиц.

Придётся нам немного вспомнить математику. Функция, которая превращает произведение в сумму, – это логарифм. Грубо говоря, ухо «логарифмирует» интенсивность и воспринимает это как громкость.

Чтобы приблизить объективную характеристику звуковой волны – интенсивность – к субъективной характеристике звука – громкости, в акустике ввели понятие уровня громкости, измеряемого в децибелах (дБ). Нулевой уровень громкости (0 дБ) соответствует порогу слышимости при частоте 1000 Гц, то есть интенсивности  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>. При возрастании интенсивности в *10 раз уровень громкости увеличивается на 10 дБ*, при возрастании интенсивности в  $100=10^2$  раз – на 20 дБ ... при возрастании интенсивности в миллион ( $10^6$ ) раз – на 60 дБ. Боле-

вому порогу, то есть интенсивности в  $10^{12}$  раз больше порога слышимости, соответствует уровень громкости 120 дБ.

**Для тех, кто любит формулы, приведём математическое определение уровня громкости  $L$  (в децибелах):**

$$L = 10 \cdot \lg I/I_0,$$

**где  $I$  — интенсивность звука,  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> — порог слышимости при частоте 1000 Гц.**

Наше ухо уверенно различает (громче — тише) разницу в уровнях громкости в 3 дБ, что соответствует возрастанию интенсивности (и звукового давления) примерно в два раза.

Для ориентировки в уровнях громкости:

10 дБ — еле слышно, тихий шелест листьев

30 дБ — тиканье настенных часов

40 дБ — обычная речь

70 дБ — громкие разговоры, смех

90 дБ — громкий крик человека

100 дБ — езда на мотоцикле, визг бензопилы

120 дБ — работающий отбойный молоток на расстоянии 1 м.

**Оперный певец имеет шанс петь ведущие партии, если сила его голоса позволяет ему «выдавать на-гора» 120 дБ и более, чтобы не потеряться на фоне оркестра.**

Но даже при равных уровнях громкости (в децибелах) субъективное восприятие громкости звуков разных частот не совпадает: чем ближе звук к частотным границам звукового диапазона (очень низкий или очень высокий), тем хуже мы его слышим. Особенно сильно это различие проявляется при малых уровнях громкости.

## **ШАГАЯ ПО СТУПЕНЯМ ГАММЫ**

Вы уже знаете, что высоту тона мы определяем по основной частоте  $f_0$  (даже если она объективно отсутствует в звуке): чем больше  $f_0$ , тем выше звук. Но ощущение возрастания высоты тона зависит от роста частоты нелинейно. Возьмём пример. Гамма состоит из целых то-

нов (например, интервалы между до и ре, ре и ми) и полутонов (это звуковой интервал между чёрной и белой клавишами рояля). Разность частот для тонов до и ре первой октавы 32 Гц. Будет ли такой же разность частот между тонами ре и ми, а также между частотами до и ре второй октавы? Оказывается, нет.

Нам кажется, что высота тона возрастает на одну и ту же величину, когда частота возрастает в одно и то же число раз (это похоже на восприятие нами соотношения громкостей звуков). Когда мы шагаем по ступеням гаммы (до, ре, ми), нам кажется, что высота звука с каждым шагом увеличивается на одну и ту же величину (мы так и говорим: шаг на тон выше). Между тем шаг на один тон вверх означает увеличение частоты в 1,122 раза (в современной равномерно темперированной шкале). Возрастание частоты в 1,5 раза мы воспринимаем как скачок на квинту, в два раза — скачок на октаву.

**Используемый в европейской музыке со времён Баха равномерно темперированный строй устроен очень просто: интервал октава (то есть удвоение частоты) делится на 12 неравных ступеней — полутонов — так, что переход от одной ступени к следующей означает возрастание частоты в  $\sqrt[12]{2} \approx 1,059453$  раза, а шаг на целый тон, соответственно, увеличивает частоту в  $(1,059453)^2 \approx 1,122$  раза.**

Слуховой аппарат человека очень чувствителен к изменению высоты звука: на слух человек способен различить более 600 градаций высоты тона, причём максимальная чувствительность слуха к изменению высоты звука приходится на диапазон 200–1000 Гц (средний диапазон рояля). В европейской музыке используют гораздо меньше звуковысотных градаций: так, на рояле всего 88 клавиш. К примеру, в индийской музыке используют гораздо больше звуковысотных градаций.

**В начале XX века в Европе и России активно развивалось направление так называемой микротоновой музыки, в которой полутоном дробился на более мелкие интервалы. С микрохроматикой (дроблением полутона)**

**экспериментировали многие известные композиторы XX века: Пьер Булез, Бела Барток, Кшиштоф Пендерецкий, Альфред Шнитке, Эдисон Денисов, София Губайдулина и другие.**

При частотах ниже 50 Гц способность различать высоту звука сильно падает. Те, кто учился музыке, знают, что опознать одни и те же звуковые интервалы в самой нижней октаве гораздо труднее, чем в средних и верхних регистрах.

При определении на слух высоты звука важную роль играет его тембр, и особенно важны первые семь–восемь гармоник. Вы же помните, что разность частот гармоник воспринимается ухом как субъективный тон. Когда он совпадает с высотой основного тона, это служит мощной поддержкой слуху для распознавания высоты тона. Даже музыканту с абсолютным слухом трудно определить на слух высоту чистого тона, создаваемого эталонным генератором и не имеющего других гармоник.

Для очень высоких звуков с частотой выше пяти тысяч герц высота тона вообще не распознаётся. Причина в том, что высшие гармоники таких звуков (кроме, может, первых двух) выходят за пределы частотного звукового диапазона и не могут служить опорой для опознания основного тона. Не случайно для музыкальных инструментов основные частоты звуков не сильно превышают две тысячи герц (лишь у флейты-пикколо частоты звуков достигают четырёх тысяч герц).

## **В ЧЁМ КРАСОТА ЗВУКОВЫХ СОЧЕТАНИЙ?**

Почему одновременное звучание одних звуков красиво, а других неприятно? Возьмите на рояле две ноты, отличающиеся на октаву (например, «до» первой и «до» второй октавы) или квинту («до» и «соль») — эти сочетания воспринимаются как благозвучные и нравятся даже младенцам и животным. Красиво, гармонично звучащие пары звуков называют консонансами (от французского *consonance* — согласие). Раздражающее, нестройное звучание называют диссонансом (что значит несогласие).

Для всех одноимённых интервалов отношение частот основных тонов пары звуков одно и то же. Так, для самого благозвучного интерва-

ла — октавы — частоты отличаются в 2 раза; для всех квинт — в 1,5 раза, то есть частота верхнего тона относится к частоте нижнего тона как 3:2, для кварт — как 4:3. Оказывается, для всех консонансных интервалов основные частоты верхнего и нижнего тонов относятся как небольшие целые числа. А вот для неблагозвучных интервалов отношение частот тонов выражается весьма большими числами — например, для звуков полутона это примерно 16:15.

Октава — наилучший консонанс. Пусть  $f_0$  — основная частота нижнего тона (основания интервала), тогда  $2f_0$  — частота верхнего тона (вершины интервала). Весь гармонический ряд вершины ( $2f_0, 4f_0, 8f_0, 16f_0...$ ) входит в состав гармонического ряда основания ( $f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0, 6f_0...$ ). Получается, что вершина усиливает обертоны основания, не внося никаких новых гармоник. Так что для уха эти два звука практически сливаются в один.

Посмотрим теперь на обертоны чистой квинты (до — соль). Гармонический ряд основания:  $f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0, 6f_0...$ . Гармонический ряд вершины:  $1,5f_0; 3f_0; 4,5f_0; 6f_0...$ . Все чётные гармоники вершины входят в состав гармонического ряда основания, все нечётные обертоны — это новые частоты, не содержащиеся в звуке основания. Нашему слуху такой расклад тоже нравится: чем меньше общее число гармоник, которые надо опознать, тем приятнее. Работает принцип экономии усилий.

Чем меньше целые числа, составляющие отношение частот основных тонов двух звуков, тем больше у этих звуков общих гармоник и тем гармоничнее для слуха звучит интервал.

**Восприятие консонансов, как и чистых музыкальных звуков, стимулирует выработку гормона серотонина, который отвечает за хорошее настроение и эмоциональную устойчивость.**

Уже грудные младенцы в возрасте двух-шести месяцев отдают явное предпочтение консонансам.

А вот у полутонного интервала (отношение частот 16:15) лишь каждый 15-й обертон основания совпадёт с обертоном вершины,

но так много обертонов даст далеко не каждый музыкальный инструмент, да и не от каждой частоты ухо способно услышать 15-й обертон. Так что можно считать, что у основания и вершины вообще нет общих обертонов. Слуху это категорически не нравится.

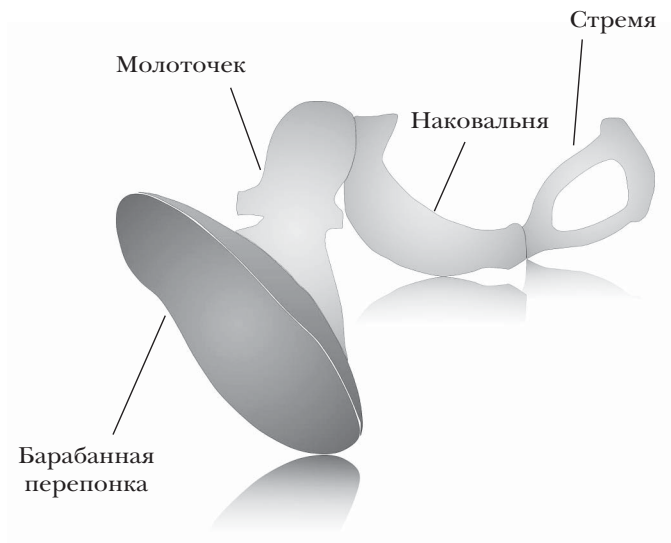
**Все интервалы равномерно темперированного строя, кроме октавы, не вполне чистые. Так, для квинт отношение частот отличается от идеального 3:2 на 0,11%. Но даже музыканты с тонким слухом воспринимают эти интервалы темперированного строя как чистые. Дело в том, что наш слух не замечает разность частот, если она не превышает 0,3% в диапазоне от 500 до 5000 Гц (при наличии гармоник). А вот темперированные терции (до — ми) и сексты (до — ля) человек с тренированным слухом в принципе может отличить от чистых (идеальное целочисленное отношение для этих интервалов отличается больше чем на 0,3% от темперированного).**

## **КАК РАБОТАЕТ НАША СЛУХОВАЯ СИСТЕМА**

Давайте, наконец, посмотрим, как устроена наша замечательная слуховая система, способная не просто воспринимать звуки, сильно отличающиеся по интенсивности, но и раскладывать их на гармонические составляющие, то есть определять спектр звуков с высокой точностью.

То, что мы обычно называем ухом, — это лишь наружное ухо. Ушная раковина через слегка изогнутую трубочку — слуховой канал — направляет звук к барабанной перепонке — тончайшей мембране. Наружное ухо благодаря явлению резонанса может усилить звуковое давление в сотни раз в области частот 2–5 тысяч герц, создавая ту самую «ямку» на кривой порога слышимости, на которую мы обращали внимание на рисунке 8.

По другую сторону от барабанной перепонки начинается среднее ухо — система из трёх маленьких слуховых косточек, их называют молоточком, наковальней и стремением (рис. 9).

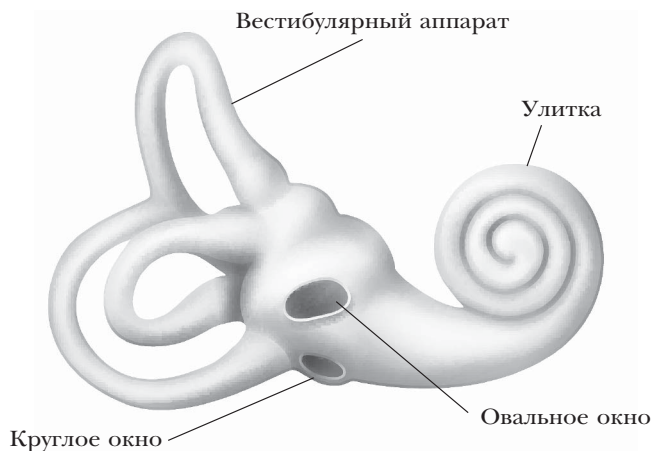


*Рис. 9. Слуховые косточки среднего уха*

**Среднее ухо соединено с носоглоткой евстахиевой трубой. Это нужно для выравнивания внешнего атмосферного давления и давления воздуха в полости среднего уха. Несмотря на солидное название, «труба» эта имеет толщину всего 2 мм, а у детей и того меньше. Поэтому нам приходится иногда ей помогать: так, в самолёте при взлёте и посадке, когда давление в салоне быстро изменяется, мы должны глубоко зевнуть или сглотнуть, чтобы быстрее выровнять давление снаружи и внутри среднего уха.**

Задача слуховых косточек – передать колебания барабанной перепонки дальше по назначению, то есть во внутреннее ухо, а заодно усилить их за счёт эффекта рычага (если эти колебания слишком слабы) или, наоборот, частично погасить их за счёт рефлекторного сокращения мышц среднего уха (для слишком громких звуков). Наковальня служит демпфером между молоточком и стремением, благодаря чему среднее ухо хорошо защищает нас от длительных громких звуков – но только до тех пор, пока мышца среднего уха не устанет, и тогда ухо начнёт постепенно глохнуть. Что касается слабых звуков, то среднее ухо может усилить их интенсивность в несколько тысяч раз!

Внутреннее ухо включает в себя вестибулярный аппарат (три полукружных канала) и главный приёмник и анализатор звука – улитку (рис. 10).



*Рис. 10. Внутреннее ухо: вестибулярный аппарат и улитка*

Улитка представляет собой свёрнутый спиралью канал, заполненный жидкостью. Канал улитки разделён по всей своей длине перегородкой – основной мембраной, состоящей из 24 тысяч поперечных волокон – слуховых струн. Струны имеют различную длину и толщину, а значит, и разные собственные частоты. Основную мембрану можно сравнить с миниатюрной арфой, только с гораздо большим числом струн и свёрнутой для компактности в спираль. Каждая из струн откликается на свою собственную частоту, так что на поверхности мембраны «представлена» вся шкала звуковых частот: на одном конце – самые высокие частоты, на другом – самые низкие. Когда слуховые струны колеблются, они возбуждают прикрепленные к ним удлиненные звуковоспринимающие клетки – слуховые рецепторы. Электрические сигналы от клеток-рецепторов передаются волокнам слухового нерва и направляются далее к коре головного мозга, где и происходит окончательное различение звуков по их характеру, высоте и силе.

**Для частот ниже 50 Гц на основной мембране улитки нет соответствующих по частоте струн. Мозг определяет высоту тона для таких низких звуков по разности частот их высших гармоник.**

Вход в улитку — это овальное окошко, прикрытое эластичной плёнкой. Стремя среднего уха упирается в эту плёнку и «запускает» звуковую волну в жидкость улитки. На рисунке 10 вы видите ещё одно окно на поверхности улитки — круглое окно: его эластичная мембрана играет роль «предохранительного клапана», спасающего улитку при слишком сильном давлении стремени на овальное окно.

Главные зоны слуха находятся в височных областях мозга. Слуховые нервы по пути в кору головного мозга перекрещиваются, так что информация от правого внутреннего уха попадает в левое полушарие, и наоборот.

## **ГЛАВА 3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗВУКОВ**

### **ОСОБО ВАЖНЫЕ ЧАСТОТЫ**

То, о чём сейчас будет сказано, пригодится нам не только в этой части книги. Мы снова вспомним об этом в части 3, когда речь пойдёт о воздействии на нас электромагнитных полей.

Как вы помните, у тел любой формы есть свои собственные частоты, зависящие от размеров, формы, плотности. А что такое наше тело, как не «набор» клеток, органов и систем? Для всех составных частей наших организмов, от молекул ДНК и клеточных мембран до крупных органов и целых систем (кровеносной, нервной) имеется свой ряд собственных частот, на которые эти части, органы и системы откликаются наиболее явно. Такие частоты определяют экспериментальным путём и называют биоэффективными. Общая закономерность проста: чем меньше орган, тем выше его собственные частоты (как и у струн: чем короче струна, тем больше её основная частота и соответственно выше тон). Так, частоты клеточных мембран имеют порядок миллиарда герц — это выходит очень далеко за пределы звукового и даже ультразвукового диапазонов. В низкий звуковой диапазон попадают биоэффективные частоты нервных волокон (50–60 Гц), некоторые частоты кровеносной системы (80 и 300 Гц). Диапазоны частот ритмов мозга достаточно широки: от 0,3 до 100 Гц — это инфразвуковой и звуковой диапазоны. В инфразвуковом

диапазоне лежат частоты отклика кровеносной, сердечно-сосудистой, нервной систем, а также крупных органов: сердца, желудка, почек, позвоночника, кишечника, лёгких и других.

Опыт показывает, что отклик на внешнее воздействие на биоэффективной частоте может как улучшить состояние организма, так и ухудшить его. Тут многое зависит от интенсивности воздействия. Когда мы имеем дело с резонансными явлениями, всегда требуется особая осторожность. Причём неважно, какова природа воздействия: звуки, механическая вибрация, электромагнитные поля — в живом организме механические и электромагнитные колебания могут трансформироваться друг в друга (так, механические сокращения сердца приводят к колебаниям его электрических потенциалов).

Теперь, когда вы узнали о биоэффективных частотах, многие из которых попадают в инфразвуковой диапазон, вас не удивляет, что инфразвук значительной интенсивности опасен для организма и вызывает неблагоприятные реакции самых разных его систем, о чём мы уже говорили в первой главе. Даже при небольшой интенсивности инфразвук может испортить настроение, причём вы даже не поймёте, почему оно испортилось.

Но учёным удаётся получить и благоприятные отклики на инфразвук. Так, с помощью инфразвука с частотой 0,9 Гц при определённой интенсивности можно повысить общий тонус, вызвать прилив бодрости и жажды действий.

**Очень сильно на человека действуют ритмичные звуки. Так, музыка с подчеркнутым ритмом 60 ударов в минуту приводит в состояние расслабления. А определённые ритмы барабанов могут ввести человека в транс.**

Роль звуков в самочувствии и здоровье человека находится в процессе активного исследования.

## **МУЗЫКА И МОЗГ**

Несомненно, музыка и звуки природы сильно действуют на человека. И тут не надо искать совпадений с биоэффективными частотами (хотя и они могут иметь значение). Просто всё то, что доставляет нам

радость, эстетическое наслаждение, чувство эйфории, полёта и вдохновения, сопровождается определёнными гормональными и биохимическими изменениями в организме, укрепляет иммунитет и продлевает жизнь. И это научно вполне обосновано.

И всё же музыка занимает особое положение среди «всех великих наслаждений», говоря словами Пушкина. Дело в том, что при восприятии музыки задействуются в той или иной степени почти все области головного мозга! Это подтверждено с помощью современных методов нейровизуализации. Отдельного центра восприятия музыки нет. Когда мы её слушаем, активируется сразу несколько областей мозга за пределами слуховой коры. Одни участки определяют источник звука, другие анализируют его частоты, третьи занимаются анализом мелодии, гармонии и ритма. В левом (доминантном, «логическом») полушарии обрабатывается смысловая информация, содержащаяся в музыке, правое (недоминантное, «интуитивное») полушарие обеспечивает переживание музыки, причём в эмоциональное реагирование вовлечена не только кора, но и подкорка — эволюционно более древняя часть мозга. А поскольку состояния повышенной творческой активности и интуитивных озарений легче всего достигаются через стимуляцию недоминантного правого полушария, то наслаждение музыкой отнюдь не бесполезное занятие!

**У профессиональных музыкантов при прослушивании музыки активнее включается «логическое» полушарие, в отличие от простых слушателей, воспринимающих музыку больше на уровне эмоций.**

## **МУЗЫКА И ДЕТИ**

За три месяца до рождения в мозгу плода уже начинают действовать слуховые системы. Он воспринимает, прежде всего, звуки организма матери. Но до него доходят и звуки внешнего мира, хотя и приглушённые, и плод реагирует на них движениями и изменением сердцебиения.

О пользе раннего музыкального развития давно и много говорят и пишут. Установлено, что длительное обучение музыке вызывает фи-

зические изменения в мозге (как, впрочем, и обучение любым другим умениям и навыкам): увеличивается площадь слуховых зон, реагирующих на музыку, образуются новые межнейронные связи, так что можно смело говорить о музыкальном развитии мозга. Мозг можно тренировать так же, как вы накачиваете мышцы при регулярных упражнениях. Но есть ли от этого толк?

Скорее всего, не случайно среди талантливых физиков и математиков многие (более 60%) обладают развитым слухом и регулярно музицируют (вспомним хотя бы Эйнштейна, играющего на скрипке под аккомпанемент другого гениального физика, Макса Планка). Идеи часто рождаются в правом, «интуитивном», полушарии, а музыка, как уже говорилось, помогает его активировать. У талантливых людей хорошо и взаимосвязанно работают оба полушария, чему также способствует музыка. Гёте, к примеру, утверждал, что ему всегда лучше работается после прослушивания скрипичного концерта Бетховена.

У детей дошкольного возраста ведущую роль в обучении чему бы то ни было играет именно недоминантное правое полушарие, и в этом же возрасте активно формируются множественные межнейронные связи. При занятиях музыкой (и другими искусствами тоже) эти процессы активизируются.

Не обязательно учить ребёнка играть на инструменте (хотя это дело очень полезное, требующее координации работы двух полушарий), можно просто слушать музыку. Многие исследования подтверждают благотворное влияние музыки на умственное развитие, развитие пространственного мышления (за которое тоже отвечает правое полушарие), речи и внимания.

Есть распространённые мифы об особом воздействии музыки Моцарта: дескать, 10 минут прослушивания его сонаты заметно повышает уровень IQ студентов. Или что дети, которые росли под музыку Моцарта, в дальнейшем достигают большего успеха в жизни. Хотя строго научных доказательств «эффекта Моцарта» и нет, но и научного опровержения тоже нет. Так что никто нам не мешает верить и применять музыку Моцарта (и не только его — прекрасных композиторов много!) в качестве универсального релаксанта и стимулятора творческой активности. Надёжно установленными можно считать

утверждения о том, что музыка должна быть: а) любимая, б) не слишком громкая.

Но о громкости будет отдельный разговор чуть позже. Сначала о приятном.

## **МУЗЫКОТЕРАПИЯ**

Греческий философ Пифагор (примерно VI век до н.э.) был убеждён, что правильно подобранная музыка может не только создавать нужное настроение, но и лечить болезни. Древнекитайский мыслитель Конфуций отводил музыке важную роль в управлении государством. В начале XIX века французский психиатр Эскироль успешно применял лечение музыкой в психиатрических клиниках. Во второй половине XX века музыкотерапия, как и арт-терапия в целом, стала одним из популярных направлений альтернативной медицины. В ряде стран Западной Европы (Швеции, Германии, Австрии) и в США возникли музыкально-психотерапевтические центры и общества. Постепенно это направление лечения развивается и в России.

Между большинством болезней и психическим состоянием человека существует прямая связь, так что целебный потенциал музыки не вызывает сомнений. Под воздействием музыки меняются артериальное давление, частота сердцебиений, ритм и глубина дыхания. И, безусловно, огромное влияние музыка оказывает на нервную систему.

Сторонники музыкотерапии делятся на две группы. Одни считают, что её целебная сила основана «лишь» на психологическом воздействии. Но даже если так, разве этого мало? Другие верят в непосредственное физическое действие на организм звуковых волн. Но все сходятся в убеждении, что, хотя мы пока и не понимаем до конца всех механизмов воздействия музыки и прочих звуков, это воздействие может помочь в лечении многих болезней. Музыкальные терапевты высоко оценивают лечебный потенциал классической музыки, а также некоторой этнической музыки. И считают вредными для здоровья тяжёлый рок и ему подобные музыкальные направления: громкие низкочастотные звуки, жёсткие ритмы и монотонные повторения рока оказывают угнетающее действие на мозг и психику. Классическая же му-

зыка, гармоничная и богатая высокочастотными звуками, даёт прилив жизненных сил и творческой энергии.

Разные инструменты дают разный терапевтический эффект: возможно, частоты-форманты разных инструментов «родственны» частотам тех или иных органов и систем. Так, согласно наблюдениям, звуки флейты помогают при заболеваниях бронхолёгочной системы (как и звуки саксофона, ксилофона, колокольчиков), кларнет хорош при сердечно-сосудистых проблемах, фортепиано и арфа успокаивают нервную систему, а барабаны оказывают оживляющее влияние.

Что лучше: играть самому или слушать? Оказывается, оба эти действия дают сравнимые результаты. Так, общеизвестно, что игра на духовых инструментах укрепляет дыхательную систему. Но и простое прослушивание музыки, исполняемой на этих инструментах, оказывает подобное действие! Почему? Да потому, что при слушании вы непроизвольно подстраиваете дыхание под ритм дыхания исполнителя, даже не сознавая этого, — подобно тому, как ваши связки беззвучно воспроизводят звуки речи, которые вы слышите. А слушая пение, мы тоже беззвучно поём. Большинство пианистов подпевают себе под нос, когда играют (на аудиозаписях Глена Гульда это хорошо слышно).

Абсолютно все специалисты сходятся во мнении об особой пользе вокала. Пение, как активное, так и беззвучное, улучшает кровоснабжение мозга, помогает наладить правильное дыхание, а также укрепляет сердечную мышцу. Когда человек поёт, во внутренних органах возникает вибрация — ведь при пении больше половины звуковой энергии идёт во внутренние органы, а не в окружающую среду. В результате улучшается кровоснабжение всех органов, снимаются застойные явления.

Сильное и прямое воздействие и на тело, и на эмоции оказывают ритмы. Определённые ритмы могут ускорять или тормозить обменные процессы, расслаблять или тонизировать мускулатуру. Поп-музыка «выезжает» во многом именно на простых ритмах (зачастую примитивных).

**Весьма опасны могут быть синтезируемые на компьютерах ритмы с одинаковой частотой, звучащие на большой громкости. Жёсткая периодичность таких ритмов**

**противоестественна — живые ритмы всегда «дышат». А низкие частоты, как мы уже поняли, могут вызвать нежелательные резонансы в организме.**

Пётр Ильич Чайковский говорил о музыке Моцарта: «Слушая его музыку, я как будто совершаю хороший поступок» (в письме к Надежде Филаретовне фон Мекк от 11/23 января 1883 года). Целительна для духа, души и тела самая разная музыка — главное, чтобы она была хорошей.

## **НЕМНОГО О МАНТРАХ**

Определённые сочетания звуков использовались во многих древних культурах для воздействия на психику и тело человека. И это понятно, ведь голос — самый совершенный и самый первый музыкальный инструмент, данный нам.

Санскритское слово «мантра» означает в буквальном переводе «инструмент мышления». Считают, что мантры появились более трёх тысяч лет назад. Для людей, практикующих йогу или медитацию, повторение мантр — это способ успокоения ума.

**Основная мантра индуизма — «Ом» (произносится как АУМ на выдохе, на одной высоте, нараспев), с неё начинаются и ею заканчиваются все индуистские молитвы (можно провести аналогию с христианским «Аминь»), причём правильному произношению мантр индийских браминов учат годами.**

Много книг написано об исцеляющей силе мантр. В сущности, это неспешное ритмичное пропевание звукосочетаний. Не только гласные, но и многие согласные звуки вызывают ощутимые вибрации в носороотоглобочном и грудном резонаторах, передающиеся и другим органам. Не говоря о психотерапевтическом действии мантр (вы же не просто их произносите — вы сосредотачиваете свои мысли на чём-то возвышенном), вибрации их звуков оказывают физическое воздействие. Вспомним о формантах гласных — повышенной силе вибраций на определённых, для каждого звука своих, частотах, не зависящих

от высоты основного тона. Веками эмпирически подбирались сочетания звуков, наилучшим образом воздействующих на те или иные системы организма. Доверимся многовековой мудрости.

## **БЕРЕГИТЕСЬ ГРОМКИХ ЗВУКОВ**

Наша слуховая система может воспринимать звуки в очень широком диапазоне интенсивностей, но всё же она лучше приспособлена для обработки звуков средней интенсивности. При длительном воздействии громких звуков у человека временно ухудшается слух — вспомним об усталости мышц среднего уха, отвечающих за амортизацию слишком интенсивных колебаний барабанной перепонки. Эффект ухудшения слуха начинает проявляться при уровне громкости более 75 дБ (шум на оживлённой улице) и может длиться до 16 часов. При длительном воздействии звуков с уровнем громкости более 90 дБ могут начаться необратимые изменения в слуховой системе, вплоть до полной глухоты. Степень повреждений пропорциональна времени воздействия громкого звука. При уровне громкости 90 дБ максимально допустимое время воздействия составляет восемь часов, 95 дБ — четыре часа, 100 дБ — два часа, 110 дБ — 30 минут (на танцевальной дискотеке вы, скорее всего, столкнётесь именно с таким уровнем громкости). При превышении допустимого временного предела полного восстановления слуха уже не происходит.

По европейским нормам максимально допустимый уровень громкости для наушников плеера равен 100 дБ. Но некоторые наушники могут выдавать громкость до 110–120 дБ! При столь высоких уровнях громкости «усталость слуха» начинает проявлять себя уже через несколько минут, и тогда звук той же самой громкости кажется более тихим, и вы ещё больше увеличиваете громкость, ведь она опьяняет, подобно алкоголю и наркотикам. Между тем повреждается миелиновая оболочка слуховых нервов. В тишине она постепенно восстанавливается. А если отдыхать ушам не дают, постепенно развивается тугоухость, иногда в течение 5–10 лет. И вот вы уже плохо понимаете речь, потому что верхний частотный диапазон, в котором лежат форманты звуков, сильно занижен. Вот уже несколько десятилетий признаки «старения слуха» наблюдаются у более чем половины выпускников школ.

**Каждый десятый любитель MP3-плееров имеет диагностированные нарушения слуха. Не злоупотребляйте громкостью и выбирайте полноразмерные наушники с шумоподавлением — они самые безопасные.**

Чрезмерное усиление звука при помощи сверхмощной электронно-акустической аппаратуры стало настоящим бичом поп-культуры. Особую опасность представляют низкие звуки и инфразвуки, выдаваемые такой аппаратурой. Этим и опасны концерты рок-музыки, хэви-металл и им подобные: уровень громкости на них достигает 110–120 дБ.

Также установлено, что звуки высоких частот в диапазоне 1000–3000 Гц и интенсивности более 90 дБ вызывают значительное повреждение сенсорных клеток головного мозга.

**Для детей и подростков предельно допустимая громкость звука — 70 дБ.**

## **ГОРОДСКИЕ ШУМЫ**

Естественные шумы звуков природы привычны и даже необходимы человеку, потому что абсолютная тишина угнетает психику. Другое дело — городские шумы: они стали важным фактором риска развития гипертонической болезни и ишемической болезни сердца. Техногенный шум увеличивает содержание в крови гормонов стресса.

Согласно санитарно-гигиеническим нормам, допустимый максимум шума для жилых помещений ночью — 45 дБ (шум кондиционера), но для разных спящих людей индивидуальный порог влияния шума варьируется от 30 до 60 дБ. Так, шум кондиционера кому-то уже может обеспечить бессонницу. Если шумовой фон по ночам достигает 50 дБ (шум вытяжного вентилятора) и более, возрастает риск сердечно-сосудистых заболеваний. Дневная норма громкости для жилых помещений — не более 55 дБ. Работающий телевизор на средней громкости обеспечивает вам 60 дБ, а если вы открыли окна, выходящие на улицу с интенсивным движением, то шум будет ещё больше. Постоянное действие шума более 80 дБ нарушает секреторную и моторную функции желудка и может привести к гастриту.

Замечали, как поездки в метро (особенно в старых вагонах) утомляют слух? При торможении поезда грохот в вагоне может достигать 110 дБ. Но опасен для здоровья только длительный шумовой фон. Звуки фена и пылесоса, хотя и громкие (до 75 дБ), угрозы здоровью не несут.

**В инструкциях к приборам или на сайтах вы можете встретить другую единицу измерения уровня громкости: не дБ (децибел), а дБа (акустический децибел). Разница между ними в том, что уровень громкости в дБ не учитывает различную чувствительность уха к разным частотам, а оценка громкости в дБа это различие принимает в расчёт. Санитарно-гигиенические нормы даются именно в дБа. Если сигнал по частоте приближается к границам звукового диапазона, его уровни громкости по шкале дБ и дБа будут сильно отличаться. Так, для инфразвука акустическая (слышимая) громкость становится равной нулю даже при значительной объективной громкости в дБ, поэтому уровни громкости инфразвука указывают только в дБ.**

Немецкий врач-гигиенист Роберт Кох в своё время предсказывал: «Когда-нибудь человечество будет справляться с шумом столь же решительно, как оно справляется с холерой и чумой». Но пока что более половины населения Европы проживает в районах с уровнем шума 60–65 дБ, и этот уровень продолжает увеличиваться. Вред от шумового загрязнения стал сравнимым с вредом от курения (а по некоторым оценкам, шум сокращает жизнь даже больше, чем курение).

**Если у вас в комнате включены сразу два прибора, создающие шум по 40 дБ каждый, не переживайте: общий уровень громкости будет не 80 дБ, а всего 43. Ведь возрастание интенсивности звука в два раза соответствует увеличению уровня громкости примерно на 3 дБ, ведь ухо «логарифмирует» звуковой сигнал. Как всё же мудро устроен наш слух!**

# ЧАСТЬ 2. ЧТО НАМ СВЕТИТ

*Весь мир и мы сами пронизаны электромагнитными полями, и свет – одна из их разновидностей, и можно смело сказать: важнейшая для нас! По разным оценкам, от 60 до 90% информации мы получаем через зрительный канал, и освещение – это то, что позволяет нам это делать. Но если на протяжении веков освещение было исключительно естественным, то вот уже более ста лет оно всё более вытесняется искусственным. Согласитесь: очень важно понимать, «что нам светит», какие источники света лучше выбирать для тех или иных целей и как они могут повлиять на зрение, самочувствие и здоровье. Разговор снова будет касаться как физики, так и физиологии.*

# ГЛАВА 1.

## СВЕТ И ЦВЕТ: ФИЗИКА И ФИЗИОЛОГИЯ

### ЧТО ТАКОЕ СВЕТ?

Этот вопрос рано или поздно возникает у каждого ребёнка, и ответ на него искали философы и учёные на протяжении многих столетий. К началу XX века мы получили наконец научно обоснованный ответ на этот вопрос.

Свет — это довольно узкий диапазон электромагнитных волн (что такое электромагнитные волны, мы чуть ниже обсудим). Длины световых волн очень малы — меньше размеров пылинок, поэтому их измеряют в нанометрах, то есть в миллиардных долях метра. Итак, для видимого света длины волн находятся в диапазоне примерно от 400 до 750 нанометров (сокращённо нм). По своим физическим характеристикам волны светового диапазона ничем принципиально не отличаются от волн соседних участков электромагнитного спектра. Самые короткие световые волны (менее 480 нм) соответствуют фиолетовому свету, самые длинные (более 620 нм) — красному. Только представьте: в одном миллиметре укладывается 2500 длин волн фиолетового света или 1300 длин волн красного.

Столь малые длины волн долго «скрывали» от учёных волновые свойства света, не позволяя заметить типичные для волн любой природы явления интерференции (когда при наложении волн одинаковой частоты в одних точках пространства они гасят друг друга, а в других — усиливают) и дифракции (способности волн огибать преграды и попадать в область геометрической тени).

**Когда вы любуетесь радужной окраской мыльных пузырей или цветными переливами бензиновых плёнок на воде, вы наблюдаете явление интерференции света: в зависимости от переменной толщины плёнки где-то произошло усиление голубых световых волн, отраженных от верхней и нижней поверхностей плёнки и наложенных друг на друга, а где-то — красных... А когда вы видите «радугу» на компакт-диске, поднесённом к лампе, вы встречаетесь с явлением дифракции.**

Во второй половине XVII века Ньютон экспериментально доказал, что белый свет состоит из набора чистых цветов: от красного до фиолетового. Он раскладывал белый свет в цветную радужную полосу (спектр) с помощью призмы и соединял затем все цвета обратно в белый свет. Вы наверняка видели, как солнечный свет, пройдя сквозь гранёный стакан на столе или призматическую подвеску люстры, рождает радужные полосы на столе или на стене — это и есть разложение белого света в спектр. Если выделить из спектра белого света одноцветный пучок (например, с помощью щели), то никаких дальнейших превращений его цвета при прохождении через оптические системы уже не происходит. Такой спектрально чистый цвет называют монохроматическим (то есть «одноцветным»).

Ньютон полагал, что свет — это скорее частицы (корпускулы), нежели волны. Но в первой половине XIX века Юнг, Френель и другие физики убедительно продемонстрировали волновые свойства света — интерференцию и дифракцию. К концу XIX века, благодаря теории электромагнитных полей Максвелла и экспериментам Генриха Герца, была доказана электромагнитная природа световых волн и измерена их скорость: 300 тысяч км в секунду (в пустоте). Однако в начале XX века выяснилось, что Ньютон не так уж и заблуждался: в некоторых явлениях свет ведёт себя именно как поток неделимых частиц. Их назвали фотонами.

**Наиболее явно корпускулярные свойства света проявляются в явлении фотоэффекта — выбивания светом электронов с поверхности металлов. При освещении полупроводников наблюдается внутренний фотоэффект: фотоны отрывают электроны от атомов, но освобожденные электроны не покидают полупроводник, который благодаря им получает способность хорошо проводить ток. Внутренний фотоэффект лежит в основе работы солнечных батарей.**

Такое двойственное поведение света — и как волн, и как частиц — поставило физиков в тупик. В итоге они смирились с таким странным поведением света и назвали это корпускулярно-волновым дуализмом (хотя до сих пор мы не можем наглядно объяснить такое свойство). Оказалось, что в этом смысле фотоны ничем не отличаются от других

объектов микромира, которые тоже в каких-то явлениях ведут себя как волны, а в других — как частицы.

## **ВЕЗДЕСУЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

Электромагнитные волны, видимые или невидимые, непрерывно излучаются абсолютно всеми телами: живыми и неживыми, твёрдыми, жидкими и газообразными, холодными и горячими. Речь идёт о так называемом тепловом излучении — самом универсальном, можно сказать, вездесущем виде излучений. Если тело нагрето менее чем до  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  (примерно), то его тепловое излучение невидимо для нас. Но мы можем ощущать его кожей как тепло, если источник теплее нас самих. Длины волн такого излучения превышают  $750\text{ нм}$ , то есть лежат в инфракрасном диапазоне. Действие тепловизоров (приборов ночного видения) основано на регистрации теплового излучения живых объектов, которые теплее окружающей среды.

**Электромагнитные излучения, примыкающие к красному концу видимого спектра и имеющие длины волн от  $750\text{ нм}$  до примерно  $2\text{ мм}$ , называют инфракрасным излучением.**

Мощность теплового излучения быстро возрастает с ростом температуры тела, а длины волн этого излучения становятся всё короче и короче. Тела, температура которых меньше  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , излучают только в инфракрасном диапазоне. При более высоких температурах тепловое излучение частично «пробирается» и в красную часть видимого диапазона, а при  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  свечение тела уже кажется нам жёлто-белым (но инфракрасного излучения оно испускает всё же гораздо больше, чем видимого). Солнце, температура поверхности которого около  $6000$  градусов, излучает во всех диапазонах, но преимущественно в видимом (на него приходится почти половина всей излучаемой энергии). Примерный вид спектра солнечного света изображён на рисунке 11.

Помимо инфракрасного и видимого света, Солнце испускает также волны, длина которых меньше  $400\text{ нм}$  — это невидимое ультрафиолетовое излучение. Чем горячее звезда, тем больше ультрафиолета она выдаёт. Максимум излучения звёзд с температурой поверхности более  $8000$  градусов приходится именно на ультрафиолетовую область спектра.

Электромагнитные излучения, примыкающие к фиолетовому концу видимого спектра и имеющие длины волн от 400 нм до примерно 10 нм, называют ультрафиолетовым излучением.

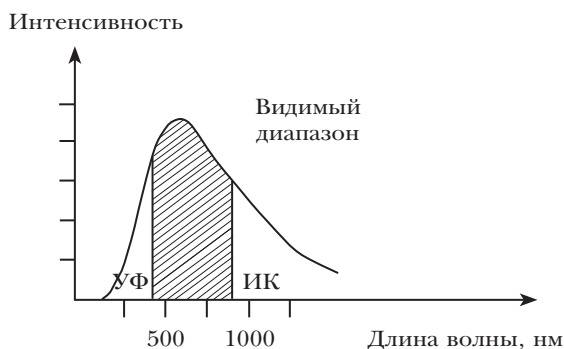


Рис. 11. Зависимость интенсивности теплового излучения от длины волны. Площадь под графиком соответствует полной мощности излучения, заштрихованная часть — мощности излучения в видимом диапазоне

Естественные источники света, к которым приспособлялась наша зрительная система за миллионы лет эволюции, — это солнечный свет и голубой свет неба днём, лунный свет и свет костра в тёмное время суток. Ввиду их особой важности для нас давайте познакомимся с ними поближе.

## ЕСТЕСТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Солнечный свет проходит сквозь атмосферу Земли и по пути видоизменяется: немного ослабляется из-за поглощения в атмосфере, а также немного желтеет, так как из пучка фотонов, идущих от солнца к глазам, выбывают коротковолновые сине-фиолетовые фотоны — они гораздо сильнее рассеиваются на молекулярных неоднородностях атмосферы, чем красные. Кстати, это одновременно ответ на вопрос, почему небо голубое: потому что мы видим небо именно благодаря рассеянному солнечному свету, в котором преобладает сине-голубая составляющая. А по ночам небо (то есть атмосфера) совершенно прозрачно и черно, потому что нет рассеянного света.

**Почему на рассвете и закате мы видим солнце красным?**

**Свет от солнечного диска, расположенного низко над горизонтом, проходит по касательной к земной поверхности, так что путь солнечных лучей в атмосфере становится**

**намного больше, чем днём, и большая часть синего и даже зелёного света рассеивается в стороны, окрашивая небо, а само солнце кажется красным.**

Максимум дневного солнечного спектра после прохождения через атмосферу приходится на жёлто-зелёный диапазон — 555 нм (запомним это число!).

Что касается ультрафиолетовой части солнечного спектра, то она практически обрывается на длине волны 290 нм, так как более короткие волны задерживаются слоем озона в атмосфере, а также поглощаются водяным паром, кислородом и углекислым газом.

Медики выделяют в ультрафиолетовом излучении три участка, в зависимости от длины волны: УФ-А (400–315 нм), УФ-В (315–280 нм) и УФ-С (280–200 нм). 99% солнечного ультрафиолета, дошедшего до поверхности Земли, приходится на участок УФ-А и 1% — на УФ-В; что касается солнечного УФ-С, то оно полностью поглощается атмосферой. Самый мягкий ультрафиолет УФ-А приводит к появлению загара: в клетках выделяется пигмент меланин, меняющий цвет кожи. Но гораздо более эффективен для загара УФ-В, под действием которого в клетках запускается производство нового меланина, а также вырабатывается витамин D. Это самая полезная для нас часть УФ-спектра — при её отсутствии снижаются защитные функции организма и ухудшается обмен веществ (но «употреблять» её нужно в разумных количествах). Более жёсткое УФ-С излучение Солнца, хотя его и немного в исходном спектре Солнца, было бы губительно для нас, так как оно убивает микроорганизмы и живые клетки. Считается, что жизнь не могла выйти из океанов на сушу, пока в атмосфере не образовалось достаточно озона для поглощения УФ-С.

В тёмное время суток людям светила луна. Лунный свет — это не собственное излучение луны, а отражение солнечного света, и он имеет почти такой же спектр, как солнечный, но в нём меньше синего и больше красного. Нашим же глазам луна кажется иногда серебристо-белой, иногда жёлтой. Мы позже ещё поговорим о том, почему цвета предметов не совсем такие, как можно было бы ожидать по спектральному составу их излучений. Например, цвет пламени костра вы воспринимаете как жёлто-оранжевый, а не красный, хотя спектр его теплового излучения лежит почти целиком в инфракрасной области,

и только незначительная доля энергии излучается в видимом диапазоне, быстро убывая от красной его части к жёлтой.

## **СВЕТ В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА**

Как вы думаете, почему мы воспринимаем как видимый свет именно такие длины волн (400–750 нм), а не иные? Тому есть ряд причин.

Во-первых, как мы видели на рисунке 11, именно в этой области частот наше Солнце излучает максимальную энергию (почти половину от полной энергии излучений). Естественно, эволюция устроила так, чтобы глаз наилучшим образом воспринимал тот свет, который преобладает в спектре главного светила.

Во-вторых, глаза не случайно невосприимчивы к инфракрасному излучению. Будь это не так, собственное тепловое излучение глаза, приходящееся как раз на инфракрасную область, полностью затмило бы приходящий извне свет, и работа глаза была бы невозможной. В этом одна из главных причин (к такому заключению пришёл знаменитый физик Сергей Вавилов). Кроме того, энергии инфракрасных фотонов недостаточно для возбуждения химического действия света в рецепторах глаза.

В-третьих, ультрафиолетовая граница видимой области тоже не случайна. Прошедший сквозь атмосферу ультрафиолет УФ-А и УФ-В почти полностью поглощается внутри глаза, особенно в хрусталике. И это прекрасно, потому что он представляет угрозу для сетчатки глаза. Кстати, хрусталик детского глаза более проницаем для ультрафиолета, так что глаза ребёнка требуют особой защиты.

**Оконное стекло и обычное стекло очков частично пропускают ультрафиолетовое излучение. Для защиты глаз от солнечного ультрафиолета требуются очки со специальными покрытиями.**

Итак, мы разобрались, почему именно такие длины волн эволюция выбрала для нашего зрения. Но и в пределах видимого диапазона чувствительность глаза к разным длинам волн очень сильно отличается, что видно из рисунка 12. Там представлены так называемые «кривые видности» (чувствительности глаза) для дневного зрения (кривая 1) и ночного зрения (кривая 2). При дневном свете глаз лучше всего воспринимает жёлто-зелёный свет с длиной волны 555 нм, ведь именно на эту длину волны приходится максимум интенсивности солнечного

света, прошедшего через атмосферу. Примем чувствительность глаза к свету этой длины волны за единицу. По мере удаления от этой длины волны относительная чувствительность глаза быстро падает. Так, из рисунка 12 (кривая 1) мы видим, что для красного света с длиной волны 660 нм чувствительность глаза равна примерно 0,1. Это означает, что требуется в 10 раз бóльшая интенсивность красного света, чтобы вызвать такое же зрительное ощущение яркости, как для жёлто-зелёного света.

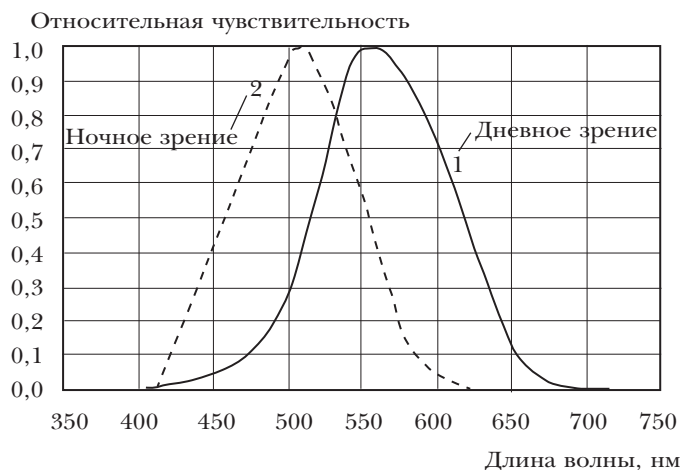


Рис. 12. Относительная чувствительность глаза к различным длинам волн при дневном (1) и ночном (2) зрении

Кстати, в этой «кривой видности» кроется ответ на вопрос, почему воспринимаемый цвет объекта не соответствует его реальному спектру. Глаз «умножает» интенсивность каждой присутствующей в спектре компоненты света на свой коэффициент — относительную чувствительность к данной длине волны. Например, в спектре пламени свечи интенсивность монотонно возрастает от синего конца к красному (рис. 13), а после процедуры умножения на функцию видности получается максимум в жёлто-оранжевой части, и мы таким и видим пламя. При равной чувствительности глаза ко всем длинам волн пламя воспринималось бы тёмно-красным. Такой же «трюк» глаз проделывает со спектром лампы накаливания (он похож в видимой области на спектр пламени свечи), в результате чего её свет нам кажется жёлто-белым вместо красного.

Для сумеречного зрения максимум чувствительности глаза приходится на длину волны 507 нм — это зелёный цвет (кривая 2). В темноте мы лучше воспринимаем сине-зелёную часть спектра. Замечали, что в сумерках зелёные листья видятся более светлыми, а красные цветы кажутся совсем чёрными? Цвета же предметов мы в сумерках и вовсе не различаем (как говорится, в темноте все кошки серы). Почему? Об этом поговорим дальше.

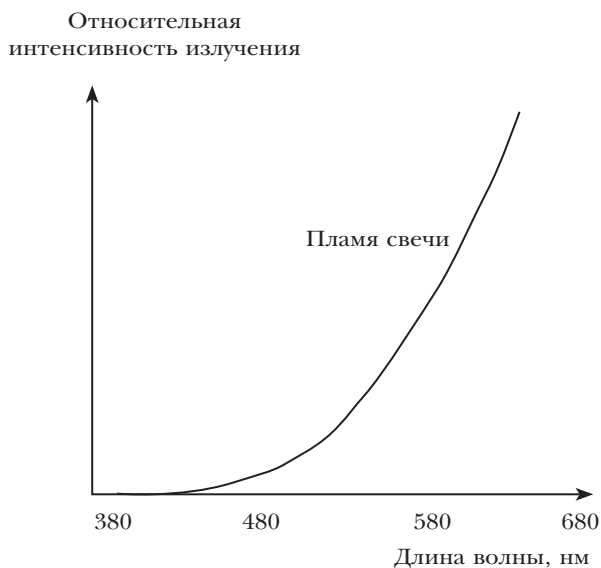


Рис. 13. Спектр пламени свечи в видимом диапазоне

Безусловно, зрение — это очень важно. Но свет не только позволяет нам видеть, но и помогает мозгу синхронизировать физиологические процессы и обмен веществ со временем суток, то есть свет управляет нашими биологическими часами. Яркий дневной свет заставляет шишковидную железу мозга вырабатывать серотонин — гормон «бодрости и счастья». Причём важна не просто яркость света, а наличие сине-голубой составляющей — как в свете дневного неба. Чем ближе к вечеру, тем меньше остаётся голубого в спектре солнечного света, начинают преобладать красные цвета заката или света костра. Это сигнал для шишковидной железы, что пора прекращать производство серотонина и приступать к выработке мелатонина — гормона сна. Запомним: за два-три часа до сна голубого света в спектре источника быть не должно, а то потом не уснёшь! Но если и днём совсем не было го-

лубого света, сон будет неглубоким, неполноценным (зимой в северных регионах у людей возникает «световое голодание»).

Шишковидная железа принимает сигналы не от тех рецепторов сетчатки, которые отвечают за зрение, а от специальных фоточувствительных клеток, залегающих в более глубоких слоях сетчатки. Поэтому даже при полной потере зрения свет может продолжать влиять на работу мозга.

**Не получая дневного света, наши биологические часы начинают отставать: по каким-то причинам они добавляют к суткам лишние 30 минут. Дневной свет каждое утро перезапускает наши внутренние часы.**

## КАК УСТРОЕН ГЛАЗ ЧЕЛОВЕКА

Пора нам обсудить строение глаза, объясняющее особенности и нашего цветовосприятия и адаптации к изменяющимся условиям освещения.

Глаз как оптическая система похож на фотоаппарат: система линз, подобно объективу фотоаппарата, создаёт изображение внешнего мира на светочувствительной внутренней поверхности глаза – сетчатке. Основное преломление обеспечивает роговица – выпукло-вогнутая линза (как в наручных часах). Хрусталик, эластичная двояковыпуклая линза, может почти мгновенно менять свой диаметр, из-за чего изменяется его фокусное расстояние, и человек может чётко видеть и вблизи, и вдали. Радужная оболочка с круглым отверстием переменного диаметра – зрачком – играет роль диафрагмы, регулирующей поступление света в глаз. На ярком свете зрачок сужается, в темноте – расширяется, пропуская в глаз больше света.

Внутренняя оболочка глаза – сетчатка – состоит из светочувствительных рецепторов. Клетки-рецепторы делятся на два вида: колбочки и палочки. В них находятся особые светочувствительные пигменты. Под действием света они разлагаются, а в темноте снова восстанавливаются. Изменение химического состава пигментов вызывает раздражение волокон зрительного нерва, электрический импульс от которых передаётся в головной мозг.

Ночное зрение обеспечивают палочки (всего 130 миллионов палочек толщиной 2 микрометра). Они способны воспринимать свет

очень малой интенсивности, но не различают цвета, потому что содержат только один сорт светочувствительного пигмента.

Дневное зрение обеспечивают колбочки (7 миллионов колбочек толщиной 6 микрон). Они чувствительны к цветам, но зато менее чувствительны к интенсивности: для их работы требуется яркий свет.

Распределение рецепторов на сетчатке неравномерно. На ней есть особое место вблизи центра, называемое жёлтым пятном. Здесь преобладают колбочки, а палочек очень мало. К периферии сетчатки, наоборот, число колбочек быстро уменьшается, и остаются одни только палочки, поэтому в темноте мы лучше видим объекты «боковым» зрением. Кстати, если хотите в шутку напугать приятеля в темноте, вставайте прямо по курсу — и он вас не заметит; движение же сбоку, на периферии поля зрения, сразу привлечёт его внимание.

Диаметр жёлтого пятна около 1 мм, а соответствующее ему поле зрения глаза — всего 6–8 градусов. В жёлтом пятне к большинству колбочек подходят отдельные волокна зрительного нерва; вне жёлтого пятна одно волокно зрительного нерва обслуживает целые группы колбочек или палочек. Поэтому только в области жёлтого пятна, то есть в очень небольшом поле зрения, глаз может различать тонкие детали, причём только при ярком свете. Мы этот факт особо не осознаём, потому что при рассматривании предмета наш взгляд всё время беспорядочно перемещается по объекту, сосредотачиваясь на разных его участках — мы сканируем объект глазами, а мозг создаёт и хранит его целостный образ.

**Там, где ствол зрительного нерва «входит» в глазное яблоко, находится слепое пятно: в этом месте нет ни колбочек, ни палочек — оно нечувствительно к свету. Убедиться в его существовании можно так: поднесите рисунок к глазам на расстояние около 10 см, закройте левый глаз и смотрите на крестик правым глазом. Перемещайте немного глаз вперёд-назад, и в какой-то момент изображение кружка исчезнет, оно попадёт на слепое пятно.**



## ЧТО ТАКОЕ ЦВЕТ?

Строго говоря, световые волны сами по себе не имеют цвета. Он возникает лишь при восприятии этих волн человеческим глазом и мозгом. Когда мы говорим про монохроматический свет с длиной волны 400 нм, что он фиолетовый, мы хотим сказать, что таким его воспринимают наши глаза и мозг.

Диапазоны длин волн монохроматического света, соответствующие основным цветам радуги, примерно таковы:

- красный: 750–620 нм
- оранжевый: 620–590 нм
- жёлтый: 590–575 нм
- зелёный: 575–510 нм
- голубой: 510–450 нм
- синий: 450–480 нм
- фиолетовый: 480–400 нм

**У каждого монохроматического цвета есть дополнительный цвет: если из полного солнечного спектра убрать данный цвет, оставшаяся «смесь» будет восприниматься как дополнительный цвет. Так, дополнительный к фиолетовому — жёлтый (и наоборот), к красному — зелёный.**

Но если глазу предъявить сразу несколько монохроматических цветов, ощущения «аккорда», как при слышании нескольких звуков, не возникнет, а будет ощущение какого-то одного цвета, зачастую такого, которого нет в радуге (розового, коричневого и многих-многих других, знакомых художникам). Увы, глаз не умеет определять спектральный состав света, его легко обмануть (в отличие от слуха). Смешивая разные монохроматические и немонахроматические цвета, можно получить все возможные цветовые оттенки. Но самое интересное, что все цвета, которые мы знаем, можно создать, смешивая всего три основных монохроматических ингредиента: красный, зелёный, синий, варьируя их относительную интенсивность.

Это объясняется тем, что на сетчатке есть три типа колбочек, содержащих три различных пигмента и проявляющих наибольшую чувствительность к различным диапазонам видимого спектра:

красно-оранжевому (примерно 600–700 нм);

жёлто-зелёному (примерно 500–600 нм);  
сине-фиолетовому (примерно 400–500 нм).

На краях диапазоны чувствительности трёх типов колбочек частично перекрываются. Комбинации их возбуждений дают мозгу ощущения всей гаммы цветовых оттенков. Чтобы получить белый свет, надо или соединить все цвета радуги в той пропорции, в которой они присутствуют в спектре солнечного света, либо подобрать пропорцию трёх основных цветов (если не очень придирааться к качеству, хватает и двух: синего и красного).

**В случае отсутствия у человека одного или двух типов колбочек цветовосприятие нарушается. Этот дефект зрения называют дальтонизмом (по имени физика Дальтона — первого исследованного дальтоника). Дальтонизм обусловлен изменением в мужской хромосоме и встречается чаще у мужчин. А у небольшого числа женщин, наоборот, имеется четвёртый вид колбочек, позволяющий им различать гораздо больше цветовых оттенков.**

## ЦВЕТА ПРЕДМЕТОВ

Мы обсудили, как глаз реагирует на спектральный состав воспринимаемого излучения. Поставим теперь вопрос немного иначе: почему предметы имеют разные цвета? От чего зависят их цвета?

Во-первых, от свойств самих предметов. Во-вторых, от спектрального состава освещения.

Дело в том, что вещества поглощают падающий на них свет избирательно: какие-то длины волн поглощаются, другие — отражаются, а чаще рассеиваются в разные стороны и попадают нам в глаза. Благодаря этому рассеянному свету мы и видим предметы, которые сами по себе не излучают видимый свет. Пусть, к примеру, предмет поглощает все длины волн, за исключением красных, которые он рассеивает. Тогда мы будем видеть его красным, но при условии, что красный свет присутствует в спектре внешнего освещения. Если же красная компонента в освещении отсутствует, предмету будет нечего отражать и рассеивать, и мы увидим его чёрным.

Но это очень простой пример. Не исключено, что тот предмет, который мы воспринимаем как красный, поглощает только зелёный,

так что при освещении его полноценным белым светом в рассеянном свете присутствуют все цвета, кроме зелёного. А красная окраска объясняется тем, что это дополнительный цвет к зелёному, поэтому вычитая из полного спектра зелёный, получаем красный. Вообще, только по цвету предмета, без спектральных приборов, нельзя понять, что же именно он поглощает и что «отдаёт обратно».

Мы так привыкли воспринимать цвета предметов при солнечном освещении, что отождествляем их с этими цветами. Говоря, что листья зелёные, мы подразумеваем освещение белым светом. Содержащийся в листьях хлорофилл поглощает красную и синюю части солнечного света и отражает зелёную. Но представьте себе, что зелёного света не будет в составе освещения, тогда цвет листьев изменится. Осветите их в темноте красным фонариком — и листья станут чёрными. Для правильной (то есть привычной нам) цветопередачи спектр источника света должен быть максимально похож на солнечный. Мы вспомним этот факт, когда дойдём до обсуждения искусственных источников света.

## **АДАПТАЦИЯ ГЛАЗА К СВЕТУ, ТЕМНОТЕ И ЦВЕТУ**

Глаз может приспособливаться к изменениям освещённости в столь же широких пределах, что и слух к изменениям громкости: наименьшая и наибольшая воспринимаемые интенсивности света отличаются в тысячу миллиардов ( $10^{12}$ ) раз! Что же позволяет этого добиваться?

Самое быстрое реагирование — это сужение или расширение зрачка. Он может изменяться в диаметре от 2 до 8 мм, при этом его площадь изменяется в 16 раз и во столько же раз — пропускаемый им световой поток.

**Важная информация! Зрачок реагирует прежде всего на жёлто-зелёную часть спектра. Если «ударить» по глазам синим светом, зрачок почти не реагирует.**

Но это не всё. Оказывается, внутри глаза присутствуют собственные «чёрные очки»: дно глаза выстлано чёрным пигментом, роль которого состоит в предохранении зрительных рецепторов от чересчур интенсивного света. При отсутствии света зёрна чёрного пигмента находятся на задней поверхности сетчатки, то есть позади светочув-

ствительных клеток («очки сняты»). При освещении зёрна перемещаются навстречу падающему свету и проникают в слои сетчатки, поглощая значительную часть световой энергии и заслоняя тем самым палочки и колбочки от избыточного светового раздражения. Этот процесс занимает некоторое время, поэтому внезапно включающийся яркий свет ослепляет.

Для перехода от малых яркостей к большим требуется световая адаптация. При малом освещении работали палочки. Неожиданный яркий свет «ослепляет» палочки, их пигмент разрушается, и даже колбочки, не защищенные ещё зёрнами чёрного пигмента, раздражены слишком сильно. Для начала почти мгновенно сужается зрачок, но этого недостаточно. Только постепенно, по мере перемещения зёрен чёрного пигмента, прекращается неприятное чувство ослепления. Световая адаптация продолжается 8–10 мин.

Если же глаз первоначально имел дело с ярким светом, то после выключения света начинается темновая адаптация. На свету работали колбочки, палочки же были ослеплены, их пигмент выцвел, чёрный пигмент проник в сетчатку, заслоняя колбочки от света. При резком уменьшении освещения вначале в течение пяти минут раскроется шире отверстие зрачка, затем из сетчатки начнёт уходить чёрный пигмент, зрительный пигмент в палочках будет восстанавливаться, и когда его наберётся достаточно, они начнут функционировать. Сначала чувствительность глаза возрастает очень быстро, затем её рост замедляется. Требуется не менее часа пребывания в темноте, чтобы чувствительность глаза достигла своего максимального значения.

Глаз способен также к цветовой адаптации. Если, например, вы долго находились в комнате с насыщенным красным светом, то, выйдя из неё в помещение с нормальным освещением, вы будете воспринимать окружающие предметы как зеленоватые, что особенно заметно на белых участках. Это связано с тем, что при долгом раздражении красночувствительных колбочек в них распадается светочувствительный пигмент. Потом он восстановится, но не мгновенно. Это физиологическая цветовая адаптация.

Но есть ещё и психологическая адаптация: мозг всё время делает поправку на условия освещения. Вспомните фотографии, сделанные при свете ламп накаливания. Обращали внимание на неестественный красно-жёлтый оттенок? Это происходит потому, что фотокамера

честно регистрирует то, что есть на самом деле. А мозг человека убирает любую постоянную примесь цвета, приспособливаясь к условиям освещения. В нашей памяти заложены характеристики цветов известных предметов: бумаги, кожи человека, листвы и так далее. И при необходимости мозг компенсирует цветовую «вуаль», переосмысливая значения всех цветов, опираясь на известные как на эталоны. Естественно, если мозг убирает из спектра некую цветовую примесь, это искажает цвета некоторых объектов. Поэтому условия освещения играют такую важную роль в точной работе с цветом, да и просто для комфортного самочувствия.

Подытожим всё сказанное, чтобы ответить на вопрос: какое искусственное освещение было бы максимально комфортно для глаз? С непрерывным спектром (содержащим все цвета радуги), похожим на спектр солнечного света, то есть с максимумом интенсивности в жёлто-зелёной части. Желательно обеспечить наличие голубой (подчёркиваю: голубой, а не сине-фиолетовой!) спектральной составляющей в дневное время для выработки достаточного количества гормона бодрости – серотонина. И ещё более важно в вечернее время убирать синие цвета из спектра, чтобы не мешать организму готовиться ко сну.

Ну что ж, теперь мы вооружены необходимыми сведениями о свете и о нашей зрительной системе и готовы приступить к обсуждению достоинств и недостатков различных искусственных источников света.

## **ГЛАВА 2. ЧТО НАДО ЗНАТЬ ОБ ИСТОЧНИКАХ СВЕТА**

В продаже мы встречаем разные типы бытовых ламп: лампы накаливания, галогенные, люминесцентные, светодиодные (или led-лампы). Помимо понятных всем мощности, напряжения, силы тока, срока службы ламп, на упаковках указан ряд характеристик. Это световой поток, светоотдача, цветовая температура, индекс цветопередачи, коэффициент пульсаций и проч. Что означают все эти характеристики и на какие из них стоит обратить внимание при покупке ламп? Давайте разбираться.

## СВЕТОВОЙ ПОТОК И СВЕТООТДАЧА

Любой искусственный источник света (о свечах мы тут не говорим) потребляет из сети электроэнергию, за которую мы (или государство) платим. Нам понятно, что за каждый час работы лампы мощностью 75 Вт придется платить в пять раз больше, чем за час работы лампы мощностью 15 Вт. Но что именно мы получаем за свои деньги? Отнюдь не только свет. Вся затраченная электроэнергия никогда не преобразуется полностью в световую, значительная её часть выделяется в виде тепла.

Световой поток — очень важная характеристика лампы. Он определяет ту часть мощности излучения, которая воспринимается глазом как видимый свет. Остальная часть излучения будет в инфракрасном (а иногда и в ультрафиолетовом) диапазоне. Световой поток — это именно то, что мы хотим получить от лампы. Чтобы рассчитать его, надо знать полный спектральный состав излучения, а также чувствительность глаза к свету разных длин волн (ту самую функцию видности, которая графически изображена на рис. 12, кривая 1). Вспомним, что при равных интенсивностях жёлто-зелёный свет воспринимается более ярким, чем красный и сине-фиолетовый. Световой поток учитывает эту особенность глаз. Для измерения светового потока ввели специальную единицу — люмен (лм).

Недостаточная освещенность в помещении, а также её переизбыток, могут вызывать повышенную утомляемость и даже головные боли. Чтобы прикинуть, сколько люменов вам потребуется для нормального освещения конкретного помещения, надо его площадь в квадратных метрах умножить на санитарно-гигиеническую норму для данного типа помещений, выраженную в лм/м<sup>2</sup> (это при условии, что светильники подвешены не слишком высоко, не выше 3 м; если же выше, то увеличьте полученное число в 1,5 раза). Санитарно-гигиеническая норма для освещенности жилых комнат составляет 150 лм/м<sup>2</sup>, для рабочего кабинета или библиотеки — 300 лм/м<sup>2</sup>. Например, если жилая комната имеет площадь 20 м<sup>2</sup>, для её освещения вам требуется 150 лм/м<sup>2</sup> · 20 м<sup>2</sup> = 3000 лм. Допустим, на упаковке лампы указан световой поток 940 лм (примерно такой световой поток даёт лампа накаливания мощностью 75 Вт), тогда потребуется минимум три таких лампы, а лучше четыре. Если же лампа даёт световой поток 1500 лм (это может быть светодиодная лампа мощностью 20–22 Вт), то достаточно

двух ламп. Итак, обеспечение достаточной освещённости — это условие нашего зрительного комфорта. Ради этого мы обращаем внимание на строку «световой поток» на упаковке лампы.

Другой вопрос — сколько нам придётся платить за обеспечение зрительного комфорта. Разные типы ламп имеют разную энергетическую эффективность — отношение светового потока к потребляемой мощности. Это отношение называют светоотдачей. Просто разделите выдаваемый лампой световой поток на потребляемую мощность, и вы узнаете светоотдачу лампы (она измеряется в лм/Вт). Так, в разобранных примерах светоотдача лампы накаливания составляет  $940 \text{ лм} : 75 \text{ Вт} = 12,5 \text{ лм/Вт}$ , а светоотдача светодиодной лампы  $1500 \text{ лм} : 20 \text{ Вт} = 75 \text{ лм/Вт}$ . Чем больше светоотдача, тем выгоднее лампа. Учитывать светоотдачу разных типов ламп важно в целях экономии денег и электроэнергии. Заменяв три 75-ваттных лампы накаливания из нашего примера на две 20-ваттные led-лампы, мы будем тратить вместо  $75 \cdot 3 = 225 \text{ Вт}$  всего  $20 \cdot 2 = 40 \text{ Вт}$  — экономия электроэнергии более чем в пять раз.

**Самую высокую светоотдачу имеют светодиодные лампы: от 50 до 90 лм/Вт, самую низкую — обычные лампы накаливания (10–15 лм/Вт).**

## ИНДЕКС ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ И ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Обе эти характеристики тоже касаются зрительного комфорта: мы хотим видеть естественные цвета предметов. Насколько хорошо искусственный источник света обеспечивает такую возможность, определяется спектром его излучения.

Цвет предметов, как мы помним, меняется в зависимости от освещения. Для источников света ввели специальный параметр — индекс цветопередачи (обозначения: Ra или CRI, от английского Color Rendering Index). Он показывает, насколько натурально выглядят цвета предметов в свете данного источника, и может меняться в диапазоне от 0 до 100. Индексом цветопередачи 100 «наделили» солнечный дневной свет. Если Ra (он же CRI) искусственного источника света больше 90, цветопередача считается очень хорошей, от 60 до 80 — просто хорошей, от 40 до 60 — посредственной, менее 40 — очень плохой, представляющей дискомфорт для глаз. Покупая лампу, обратите

внимание на эту характеристику: индекс цветопередачи для жилых помещений должен быть не менее 80.

Естественный свет различается в разное время суток и при различной погоде. Мы говорим: тёплый солнечный свет, холодный свет луны или пасмурного неба. Цветовая температура ( $T_{ц}$ ) связана с цветовой тональностью освещения. Её принято измерять в градусах Кельвина (К). Чем выше цветовая температура, тем «холоднее» свет: в нём больше представлена синяя составляющая спектра и меньше – красная. Мы как бы подбираем такую температуру теплового излучения (света свечи, солнца, раскалённого тела), при которой оно имело бы похожий окрас (в нашем восприятии). Так, при цветовой температуре 2000 К свет по окрасу похож на пламя свечи, при 3500 К – на свет утреннего солнца, при 5000 К – на полуденный солнечный свет, при 6000–7000 К – на свет облачного неба, при 9000–10000 К – на яркий свет синего неба.

### **Температура в градусах Кельвина на 273 градуса выше температуры, измеренной по более привычной нам шкале Цельсия.**

Все источники света, в соответствии с их цветовыми температурами и окрасом света, разделены на три группы:

$T_{ц}$  ниже 3500 К – тёплый белый свет;

$T_{ц}$  от 3500 до 5300 К – нейтральный белый, или дневной, свет;

$T_{ц}$  выше 5300 К – холодный белый свет.

Лампы накаливания имеют цветовую температуру от 2200 до 2800 К (чем больше мощность лампы, тем выше  $T_{ц}$ , тем белее её свет), а разные типы светодиодных ламп – от 2700 до 8000 К.

Цветовая температура влияет на величину комфортной освещённости. Однако в санитарно-гигиенических нормах освещённости это влияние не учитывается! Но имейте в виду: при высокой цветовой температуре, когда в спектре лампы мало красного света, для создания комфортной для глаз световой среды требуется существенно больший уровень освещённости, чем прописано в санитарно-гигиенических нормах. Например, при  $T_{ц} = 6000$  К нормальная для жилой комнаты освещённость 150 лм/м<sup>2</sup> будет ощущаться как «мало света», и для комфортного ощущения вам потребуется обеспечить освещённость минимум вдвое больше. Но, увеличивая число таких «холодных» ламп, вы

одновременно увеличивает интенсивность преобладающего в их спектре коротковолнового синего света, который при длительном воздействии вреден для сетчатки. (Об опасностях синего света ещё будет идти речь в дальнейшем.)

**Не пытайтесь создать яркое освещение с помощью ламп холодного белого света. Хотя избыток синего не воспринимается как зрительный дискомфорт, он может представлять угрозу для глаз!**

У источников с низкой цветовой температурой (менее 3000 К) есть другой недостаток: вы не сможете с их помощью обеспечить достаточно большую освещённость, если таковая требуется для тонкой работы. Дело в том, что при увеличении числа таких источников вы одновременно увеличиваете интенсивность преобладающего в их спектре красного света, который в большом количестве вызывает зрительный дискомфорт: свет кажется слишком ярким, хотя и не достигает нормального уровня освещённости. Это не опасно для глаз, просто неприятно. Так, освещённость более 250 лм/м<sup>2</sup>, созданная обычными лампами накаливания, воспринимается уже как избыточная. Чтобы увеличить её без появления дискомфорта, надо добавить лампы с более высокой цветовой температурой.

## **КОЭФФИЦИЕНТ ПУЛЬСАЦИЙ**

Этот очень важный параметр излучения изготовители ламп часто «забывают» указывать.

Свет большинства ламп, в отличие от естественного света, пульсирует, мерцает: их световой поток то усиливается, то ослабевает. У ламп накаливания пульсации связаны с переменным сетевым напряжением и происходят с удвоенной технической частотой 100 Гц. Люминесцентные и светодиодные лампы требуют для своей работы применения специальных устройств управления, часто работающих в импульсном режиме, поэтому свет этих ламп тоже может пульсировать.

Мы не воспринимаем эти пульсации визуально, но наш мозг их регистрирует. Исследования показали, что на электроэнцефалограмме мозга появляются навязанные пики активности с частотой пульсаций света. Эти навязанные ритмы подавляют естественные биоритмы

нервной системы. Воздействие оказывают пульсации света, частота которых не превышает 300 Гц. Они приводят к изменению гормонального фона, который в свою очередь влияет на наши эмоции и работоспособность. Чем сильнее пульсации, тем быстрее устают глаза, тем труднее сосредотачиваться на работе, может даже заболеть голова. Самое печальное, что эти негативные воздействия мы не ощущаем напрямую и не осознаём причину, их вызвавшую.

К счастью, не все лампы одинаково плохи. Мы подробнее обсудим пульсации разного типа ламп в следующей главе.

Величина пульсаций характеризуется коэффициентом пульсаций  $K_{п}$  и вычисляется по относительной глубине пульсаций светового потока.

**Коэффициент пульсаций равен отношению полуразности максимального и минимального световых потоков к его среднему значению и выражается в процентах. Формула для расчёта коэффициента пульсаций:**

$$K_{п} = \frac{\Phi_{\text{макс}} - \Phi_{\text{мин}}}{2\Phi_{\text{ср}}} \cdot 100\%$$

где буквой  $\Phi$  обозначен световой поток лампы.

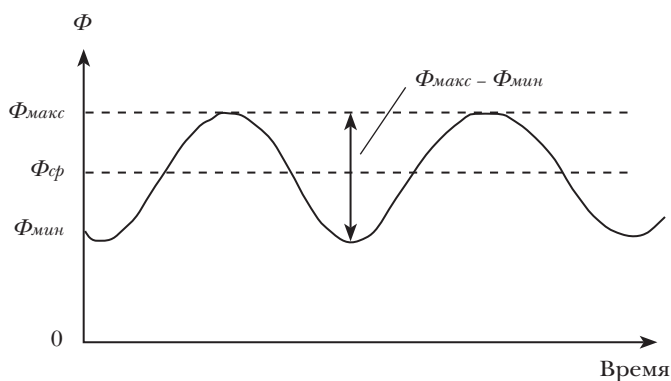


Рис. 14. Пример зависимости светового потока  $\Phi$  от времени

Для наглядности посмотрим на график (рис. 14). КП для этого примера составляет около 70%.

Работа мозга нарушается при коэффициенте пульсаций выше 5–8%, если частота пульсаций менее 300 Гц. Чем больше коэффициент пульсаций, тем хуже для мозга. Но превышение уровня пульсаций 20% уже не имеет значения: пульсации глубиной 20% и 100% создают одинаковую угрозу здоровью.

**Пульсации некоторых люминесцентных и светодиодных ламп могут быть более 30%. Длительное их воздействие опасно для здоровья!**

На территории РФ действуют санитарные нормы, ограничивающие допустимые пульсации источников света при частоте менее 300 Гц. Согласно этим нормам, в игровых комнатах детских садов и в учебных классах коэффициент пульсаций света должен быть менее 10%. Этот же норматив действует для торговых залов супермаркетов, для парикмахерских и некоторых производственных и медицинских помещений. В помещениях с непродолжительным пребыванием людей норматив допускает пульсации до 20%. Самые же строгие требования предъявляются к освещению мест, оборудованных компьютерной техникой. Здесь  $K_{\text{п}}$  не должен быть больше 5%. Это связано с тем, что помимо ламп пульсируют ещё и мониторы компьютеров, что создаёт дополнительную нагрузку на зрение и мозг.

Учтите, что при использовании диммеров (светорегуляторов) пульсации всех типов ламп могут существенно возрасти! Лучше для регулировки освещённости включать разное количество ламп.

Для измерения коэффициента пульсаций используют специальные приборы – пульсометры (или комбинированный люксметр + пульсометр).

Мы перечислили самые важные параметры ламп, на которые следует обращать внимание при выборе источников света. Ну а теперь пришла пора обсудить подробнее разные типы ламп: их принцип работы и связанные с этим достоинства и недостатки. Мы не будем рассматривать лампы для уличного освещения и других специальных целей – только применяемые в быту лампы накаливания, галогенные, люминесцентные и светодиодные лампы. И начнём с заслуженных ветеранов труда – ламп накаливания.

## ГЛАВА 3. ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Эти лампы начали постепенно входить в наш быт с конца XIX — начала XX века.

Это чисто тепловой источник света, и в этом отношении лампа накаливания — близкий родственник свечи и Солнца. Чем ближе температура теплового источника к температуре поверхности Солнца, тем больше похожи спектры их излучений. Нить накала лампы (вольфрамовый волосок, закрученный в виде спирали) при пропускании через неё тока раскаляется до температуры 2600–3000 К. Спектр её излучения непрерывный, как и солнечный, но из-за более низкой температуры максимум излучения приходится не на видимую, а на инфракрасную часть спектра. И хотя практически вся потребляемая лампой электроэнергия превращается в излучение, в видимый диапазон попадает не более 5% энергии. Это и есть КПД (коэффициент полезного действия) лампы. То есть на каждый заплаченный за электроэнергию рубль мы получаем света на пять копеек, остальное идёт на нагревание помещения инфракрасным излучением (что в холодное время года, может, и неплохо).

Понятия КПД лампы и светоотдачи родственны. При расчёте КПД мы берём отношение полезной мощности, выделяющейся в виде света, к затраченной и получаем безразмерную величину, обычно выражаемую в процентах. При расчёте светоотдачи мы берём отношение светового потока в люменах к затраченной мощности в ваттах.

Чем больше мощность лампы, тем выше температура нити накала, из-за чего значительно возрастает доля видимого излучения в спектре, и растёт светоотдача. При температуре 3400 К уже 15% электроэнергии превращается в свет. Но при такой высокой температуре вольфрамовая нить быстро испаряется и срок службы лампы уменьшается до нескольких часов, поэтому такие лампы в быту не используют. Сейчас в продаже имеются лампы мощностью 75, 60 и 40 Вт. Жаль, но 100-ваттные и 150-ваттные лампы сняли с производства, хотя они более энергоэффективны, чем маломощные лампы, хотя и менее долговечны.

С ростом мощности лампы её свет становится не только ярче, но и белее, потому что возрастает цветовая температура, что тоже существенно для нас. Так, цветовая температура 40-ваттной лампы 2200 К, 60-ваттной – 2680, а 100-ваттной – 2800 К.

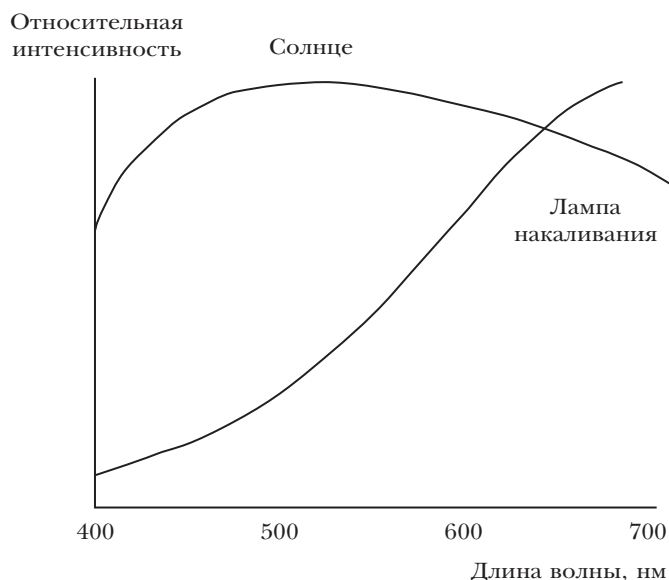


Рис. 15. Сглаженный график спектра солнечного света на уровне земли и спектр лампы накаливания

И всё же из-за того, что температура нити накала гораздо ниже температуры поверхности Солнца (около 6000 К), свет ламп накаливания содержит гораздо больше красно-жёлтой составляющей, чем голубой и синей, в то время как спектр дневного солнечного света, прошедшего сквозь атмосферу, в видимой области весьма ровный: в нём более-менее равномерно представлены все цвета радуги с нерезким максимумом в жёлто-зелёной области (в чистом солнечном свете, в космосе, максимум выражен более резко). Схематически спектры солнечного света и лампы накаливания изображены на рисунке 15. Нехватка голубой составляющей света будет существенна, если пытаться заменить дневное освещение обычными лампами накаливания (например, в условиях полярной зимы) — человек начнёт испытывать «световое голодание» и недостаток гормона серотонина.

Световой поток ламп накаливания всегда пульсирует, они ведь питаются переменным напряжением сети. Нить накала нагревается то сильнее, то слабее, но сильно изменить свою температуру она не успевает благодаря быстрому изменению питающего напряжения и тепловой инерционности. Для самых распространённых ламп мощностью 60–100 Вт, подключённых к сети напряжением 220 В, коэффициент пульсаций находится в диапазоне 10–15%, причём чем больше мощность лампы, тем меньше  $K_{\text{П}}$ . Это понятно: ведь в более мощных лампах нить накала толще, то есть массивнее, а значит, лучше сохраняет свою температуру. У 40-ваттных ламп накаливания пульсации достигают уже 20%. Сильно смягчает обстоятельство тот факт, что форма пульсаций света у ламп накаливания гладкая, близкая к синусоидальной, без резких скачков, в отличие от пульсаций люминесцентных ламп и дешёвых светодиодов. Поэтому влияние пульсаций лампы накаливания на мозг при одной и той же величине  $K_{\text{П}}$  существенно меньше, чем у других типов ламп. По этой причине и нормы по ограничению пульсаций во времена царствования ламп накаливания не вводились.

Мы видим, что во многих отношениях лампы накаливания большой мощности, накаляемые до более высоких температур, лучше и выгоднее, чем лампы малой мощности. Свет от одной 100-ваттной лампы будет лучшего качества, чем от двух 60-ваттных, и тем более лучше, чем от трёх 40-ваттных, и по цветовой температуре, и по глубине пульсаций, и по светоотдаче (энергоэффективности). Поэтому возникает недоумение: почему с 1 января 2011 года в нашей стране работает запрет на продажу именно самых мощных ламп накаливания (мощностью 100 Вт и больше)? Сегодня в продаже остались только лампы мощностью не более 75 Вт, но и их Министерство энергетики предполагает вскоре вывести из оборота.

## **ПРЕИМУЩЕСТВА ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ**

Главное их преимущество по сравнению со всеми другими источниками света — непрерывный, очень ровный спектр, подобный солнечному, комфортный для глаз. Из-за преобладания красного он напоминает свет вечернего солнца и особенно хорош перед сном, способствуя выработке гормона сна — мелатонина. Переизбыток красного в спектре благодаря особенностям «кривой видности» (см.

рис. 12) существенно сглаживается из-за снижения чувствительности глаза к этим длинам волн, так что мы воспринимаем свет лампы как жёлто-белый. Психологическая адаптация к цвету тоже вносит свой вклад, и белая бумага в свете ламп накаливания не кажется нам желтоватой.

Ультрафиолетового излучения они не создают совсем, что выгодно отличает их от других типов ламп. Другими словами, лампы накаливания абсолютно безвредны для сетчатки глаза. Это особенно существенно для освещения детской комнаты.

Индекс цветопередачи идеальный, то есть почти 100 (98,7–99,1).

Что ещё важно – в их составе нет токсичных компонент, так что специальной утилизации отработавших ламп не требуется.

Также нет нужды в специальных пускорегулирующих устройствах – просто подключаем лампу к электрической сети. Это достоинство мы осознали «задним числом», когда стали выпускать люминесцентные, а потом и светодиодные лампы, для запуска которых нужны специальные пускорегулирующие устройства.

Мгновенное зажигание тоже стало восприниматься как отличное достоинство ламп накаливания только после появления люминесцентных ламп. Добавим сюда же независимость от условий окружающей среды: температуры, влажности, радиации и прочего. Лампы накаливания исправно служат в любых помещениях, в любую погоду.

Ну и напоследок – низкая цена, радующая потребителя.

Будет очень жаль, если оставшиеся в России виды ламп накаливания тоже снимут с производства, как это уже произошло в Европе и США, лишив нас свободы выбора в пределах своей квартиры. Так хочется замолвить слово «о бедном гусаре» – лампе накаливания!

## **НЕДОСТАТКИ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ**

Главный недостаток, из-за которого лампы накаливания попали под опалу, – их низкая энергоэффективность (КПД, светоотдача). Во всём мире на освещение, по некоторым оценкам, тратится около пятой части всей вырабатываемой электроэнергии. Безусловно, в масштабах всей планеты и всей страны замена значительной доли ламп накаливания энергосберегающими типами необходима и даёт большую экономию электроэнергии.

Что также существенно — лампы накаливания считаются более пожароопасными, чем энергосберегающие лампы. Во-первых, стеклянная колба довольно сильно нагревается (у 75-ваттной лампы до 250 °С), и надо следить, чтобы она не прикасалась к воспламеняемым материалам (ткани, бумаге...). Во-вторых, при плохом контакте цоколя с пружиной патрона возникает нагрев патрона. (Но, заметим в скобках, чаще пожары случаются всё же не от ламп, а от неисправностей электропроводки.)

К недостаткам относят и относительно небольшой срок службы лампы. При нормальном напряжении (220 В), будучи без дефектов, она должна служить около тысячи часов, при напряжении 127 В — до 2500 часов. Кстати, продлить срок службы за счёт частого выключения и включения не получится, ведь именно при включении эти лампы чаще всего и перегорают, потому что в ещё не разогретой нити накаливания ток превышает рабочий в 10–15 раз.

**Среди ламп накаливания есть долгожитель-рекордсмен: «столетняя лампа», которая горит с 1901 года в одном из пожарных отделений американского города Ливермор. Вероятно, её долгожительство объясняется тем, что лампа работает на малой мощности, в глубоком недонакале.**

## ГАЛОГЕННЫЕ ЛАМПЫ

По принципу работы они тоже относятся к лампам накаливания, но с некоторыми усовершенствованиями. Колба галогенной лампы наполнена не инертным газом, как во многих лампах накаливания, а химически активным газом — галогеном (это может быть фтор, хлор, бром или йод). Галогены вступают в химические реакции с испаряющимся вольфрамом нити накаливания, образуя летучие соединения. Галогениды вольфрама летают по всему объёму колбы, а вблизи нити накаливания снова разлагаются на исходные компоненты. Атомы вольфрама частично оседают обратно на нить и образуют вокруг нити вольфрамовую «атмосферу», замедляющую дальнейшее испарение. А ведь быстрое испарение нити накаливания — главное препятствие к повышению её температуры.

В галогенных лампах температура накала увеличена до 3000–3100 К. Из-за этого заметно повышаются КПД и светоотдача. Так, светоотдача

75-ваттной лампы накаливания составляет 12,5 лм/Вт, а галогенной лампы такой же мощности — 14,5 лм/Вт. У самых мощных галогенных ламп светоотдача достигает 25 лм/Вт. Спектр немного изменяется «в пользу» голубой составляющей, и свет воспринимается глазом как яркий белый, более холодного оттенка, чем у ламп накаливания, а цвето-передача у галогенных ламп такая же, то есть приближается к 100.

Пульсации светового потока у них меньше, чем у традиционных ламп накаливания! Срок службы возрастает в два-четыре раза, а для низковольтных ламп ещё больше.

Можно было бы считать недостатком галогенных ламп слишком высокую температуру колбы (из-за этого в некоторых типах ламп её делают из кварцевого стекла). Но этот недостаток легко преодолевается путём помещения маленькой кварцевой колбы в привычный стеклянный баллон, так что издали вы не отличите такую лампу от обычной лампы накаливания.

Есть много разновидностей галогенных ламп по мощности, цоколю и типу исполнения. Отдельное направление — для автомобильных фар.

Галогенные лампы разнообразны и универсальны в употреблении. Есть виды, подходящие для точечного освещения, использования в натяжных потолках, лампы с отражателем для создания направленного светового потока, а есть варианты, заменяющие лампы накаливания в привычных светильниках. Их можно использовать с диммерами и выключателями, имеющими световой индикатор. Есть низковольтные лампы, питающиеся от сети напряжением в 12 в или 24 в (для их подключения требуется трансформатор).

**В 2016 году среди проданных ламп больше половины составляли лампы накаливания, а в 2020 году их доля сократилась до 30%, не считая галогенных ламп, доля которых в общем числе проданных ламп — 9,5%.**

Лампы накаливания долгое время были самыми популярными источниками света в наших домах, но последние десятилетия их начали активно вытеснять энергосберегающие типы ламп, люминесцентные и светодиодные.

## ГЛАВА 4. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ

Исторически первыми на смену лампам накаливания пришли люминесцентные лампы: сначала — на производстве и общественных местах, а потом — и в быту. Переходим к разговору о них.

### ПРИНЦИП РАБОТЫ

Чтобы понять, как работают эти лампы, нам придётся вкратце познакомиться с двумя физическими явлениями: газовыми разрядами и люминесценцией.

При прохождении тока через газы могут возникнуть те или иные световые и шумовые явления. Например, молния (искровой разряд). Но нас сейчас интересует так называемый тихий разряд — тлеющий. Для его возбуждения надо заполнить стеклянную трубку каким-то газом при низком давлении и приложить значительное постоянное или выпрямленное напряжение. Тогда газ начнёт светиться. Но спектр свечения будет не непрерывный, а линейчатый. Если разложить свет разряда в спектр с помощью призмы, то мы увидим не сплошную полосу с радужной окраской, как в спектрах Солнца и лампы накаливания, а отдельные цветные линии, разделённые тёмными промежутками. Линии какого именно цвета будут представлены в спектре, зависит от состава газа. Спектр — «визитная карточка» газа. Подчеркнём ещё раз, это важно: свечение тлеющего разряда — смесь отдельных монохроматических излучений. Ну а глаз такую смесь воспринимает как некий цвет. К примеру, трубка с неоном даёт оранжево-красное свечение, с аргоном — синевато-зелёное. Такие трубки используют в рекламе.

**Почему газовые разряды могут сопровождаться свечением?**

**Электроны, движущиеся в газе при пропускании тока, сталкиваются с атомами или молекулами газа и могут их возбудить или ионизовать, то есть перевести в состояние с большей энергией. Возвращаясь через короткое время в основное состояние, атомы или молекулы излучают свет.**

В бытовых лампах, о которых дальше пойдёт речь, газовый разряд происходит в смеси аргона и паров ртути, излучающей преимуще-

ственно синий и зелёный свет, а также много ультрафиолета. Сам по себе такой свет не годится для освещения. Но ультрафиолетовое излучение можно превратить в видимый свет с помощью ещё одного физического явления – люминесценции.

Некоторые вещества (их называют люминофорами) поглощают свет коротких длин волн, в том числе ультрафиолет, а затем излучают его в виде более длинных волн видимого диапазона. Это и есть люминесценция (название происходит от латинского *lumen* – свет). Вспомним светящиеся брошки или ёлочные игрушки: подержали их под лампой, а потом в темноте в течение нескольких минут видим свечение (некоторые люминофоры могут светиться несколько часов и даже суток). Это частный случай люминесценции – фосфоресценция, при которой свечение продолжается значительное время после прекращения исходного светового воздействия. А другие люминофоры переизлучают поглощённый свет почти мгновенно. Этот вид люминесценции называется флуоресценцией (название происходит от минерала флуорит, у которого она впервые была обнаружена). Они-то и используются в люминесцентных лампах.

Свет каких именно длин волн будет излучать люминофор, поглощая ультрафиолет, зависит от его химического состава. Внутренние стенки люминесцентной лампы покрывают таким люминофором, чтобы выходящий свет казался белым. Но спектр этого белого света не является непрерывным, он состоит из нескольких более-менее узких полос излучения аргона, ртути и люминофора.

**Люминесцентные «лампы дневного света» британская компания «Дженерал электрик» начала выпускать с 1938 года. Это были линейные (трубчатые) лампы с дешёвым люминофором, дающие холодный белый свет. В СССР массовое производство и внедрение такого рода ламп началось на 10 лет позже. В 1960–1970 годах они использовались в большинстве общественных мест, в том числе школах.**

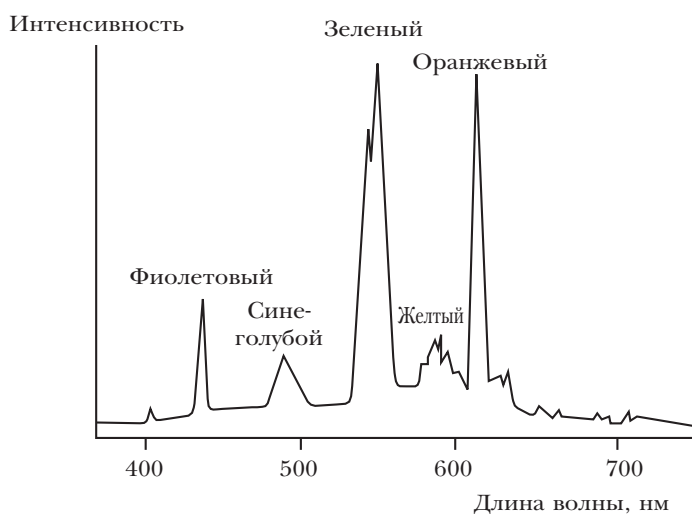
## **СПЕКТР ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП**

Люминофор – вещь чрезвычайно важная для качества света, к тому же недешёвая. В недорогих лампах используют люминофор, который излучает в основном в жёлтой и синей частях спектра, а красно-

го и зелёного света даёт значительно меньше. Хотя свет такой лампы и кажется белым, цветопередача у неё плохая. В более дорогих лампах применяют «трёхполосный» или даже «пятиполосный» люминофор, излучающий в трёх или пяти диапазонах длин волн. Цветопередача становится гораздо лучше. Пример графика спектра лампы с качественным люминофором изображён на рисунке 16. Путём подбора люминофоров в специальных лампах может быть достигнута идеальная цветопередача (они используются в картинных галереях, музеях, типографиях).

И всё же, как ни крути, спектр не станет непрерывным, привычным и комфортным глазу.

В спектре люминесцентных ламп присутствует небольшая доля ультрафиолета УФ-А и УФ-В, который не полностью поглощается люминофором и стеклом. По мере «старения» лампы эта доля возрастает из-за деградации люминофора. При длительном воздействии ультрафиолет совместно с коротковолновым сине-фиолетовым излучением лампы может оказать неблагоприятное действие на роговицу и сетчатку глаза. И не будем также забывать, что синий свет блокирует выработку гормона сна — мелатонина.



*Рис. 16. График спектра излучения люминесцентной лампы с «пятиполосным» люминофором*

**Самым опасным для сетчатки при длительном воздействии является сине-фиолетовый свет с длиной волны от 415 до 455 нм, и как раз в этой области находится пик в спектрах излучения люминесцентных ламп.**

Для некоторых специальных целей ультрафиолетовое излучение является необходимым, например в люминесцентных лампах для соляриев. В этих случаях при изготовлении колб используют не обычное, а кварцевое стекло, хорошо пропускающее ультрафиолет.

### **СТАРЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ «ЛАМПЫ ДНЕВНОГО СВЕТА»**

Люминесцентную лампу, в отличие от лампы накаливания, нельзя напрямую включить в электрическую сеть. Для её пуска и работы требуется специальное устройство – пускорегулирующий аппарат (сокращённо ПРА).

Первые модели люминесцентных ламп (линейные лампы) работали с помощью электромагнитных ПРА (или ЭмПРА), содержащих конденсаторы, стартёр для зажигания разряда и дроссель (проволочную катушку с железным сердечником) для ограничения силы тока. Но иногда такие лампы начинали гудеть из-за испорченного дросселя. А при неисправности стартёра лампа начинала мигать. Люди старшего поколения хорошо помнят, что раздражающее гудение и нервнующее мигание были частым явлением в школьных классах, рабочих кабинетах и административных зданиях, ведь лампы дневного света с электромагнитным ПРА до 1980-х использовались практически во всех общественных местах.

Излучение ламп с ЭмПРА пульсирует с удвоенной технической частотой, то есть 100 Гц, причём коэффициент пульсаций достигает 50, а иногда и 100% и наносит огромный вред зрению и здоровью. Несколько поколений людей благодаря таким лампам испортили своё зрение и нервы.

И очень существенный недостаток линейных ламп старого образца – большое содержание паров ртути (десятки миллиграммов). При разбитой колбе эти пары оказывались в воздухе помещения. Серьёзного отравления от одной разбитой лампы не будет, но ртуть имеет свойство накапливаться в организме годами, а это чрезвычайно ток-

сичное вещество! Вышедшие из строя лампы было необходимо должным образом утилизировать, что требовало материальных затрат, поэтому далеко не всегда соблюдалось на практике. Ртуть попадала в окружающую среду, загрязняя её.

Несмотря на очевидные недостатки, эти «лампы дневного света» терпели из-за гораздо более высокой светоотдачи (КПД), в несколько раз превышающей светоотдачу ламп накаливания.

Можно только радоваться, что такие лампы канули в прошлое. На смену им в 1990-х пришли компактные люминесцентные лампы (КЛЛ), которые быстро начали вытеснять не только своих линейных собратьев из учреждений, но и лампы накаливания из наших домов.

## КОМПАКТНЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ

Лампы нового поколения оснащены не электромагнитными, а электронными пускорегулирующими аппаратами (ЭПРА) на полупроводниковых элементах. ЭПРА надёжны и компактны – их можно установить прямо в цоколе лампы (точнее, в корпусе между цоколем и газоразрядной трубкой). Оснащённая ЭПРА лампа не мерцает, не гудит, быстрее зажигается и входит в рабочий режим. Благодаря ЭПРА стало возможным выпускать компактные люминесцентные лампы (КЛЛ).

КЛЛ, как и линейная лампа, содержит газоразрядную трубку, только меньшей длины и скрученную в виде спирали, так что по габаритам такие лампы могут не сильно отличаться от ламп накаливания. Многие виды КЛЛ можно вкручивать в те же самые патроны, что и лампы накаливания. Форма колб КЛЛ может быть самая разная; некоторые лампы имеют несколько трубок (рис. 17).



*Рис. 17. Примеры различного вида КЛЛ*

Из-за уменьшения размеров газоразрядных трубок светоотдача КЛЛ тоже уменьшилась, и всё же она составляет от 30 до 65 лм/Вт против 12–15 лм/Вт у ламп накаливания. Линейные лампы не ушли со сцены, но их тоже стали оснащать электронными ПРА. Светоотдача современных линейных ламп достигает 80–100 лм/Вт. Правда, со временем из-за затемнения трубок люминесцентные лампы теряют до 30% светового потока.

ЭПРА высокого качества решают и проблему пульсаций излучения. Электронная схема ЭПРА преобразует сетевое напряжение (50 Гц) в высокочастотное напряжение (20–40 кГц), которое и питает лампу. А как вы помните, мерцание с частотой выше 300 Гц уже не воспринимается глазом и мозгом. Зато и цена лампы за счет качественного ЭПРА сильно возрастает. Если же вы встречаете недорогой товар, то наверняка производители сэкономили на электронике, и свет лампы будет сильно пульсировать.

**В продаже часто встречаются лампы с некачественным ЭПРА. Их коэффициенты пульсаций достигают 45–50%.**

**Есть простой способ проверить, пульсирует ли свет лампы, с помощью видеокамеры смартфона. Надо поднести камеру довольно близко к лампе, так, чтобы на экране был виден большой светлый круг. Если по экрану пойдут полосы, то яркость лампы пульсирует. Но если лампа далеко (на потолке), способ не работает.**

У линейных ламп старого образца цветопередача была довольно плохой. У современных ламп, в зависимости от качества люминофора, индекс цветопередачи колеблется от 60 у не слишком дорогих ламп до 98 у специальных; чаще всего он будет в районе 80, причём чем лучше светоотдача, тем хуже цветопередача.

## **ПРЕИМУЩЕСТВА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП**

Главное — это, конечно, значительная экономия электроэнергии в масштабах страны и всего мира. На пару десятилетий, пока на смену

не пришли светодиодные лампы, за КЛЛ закрепилось название «энергосберегающие лампы».

Что касается экономии ваших личных средств на оплату электроэнергии, то экономия здесь не столь очевидна: вы платите меньше за освещение при той же яркости света, но больше за покупку самих ламп (будем считать, что вы покупаете качественные лампы). Оценки показывают, что экономия будет достигнута при ежедневном использовании лампы не менее трёх часов. Помещения, в которых свет включается редко и ненадолго, не стоит освещать с помощью КЛЛ.

Ещё одно достоинство КЛЛ – увеличение срока службы в несколько раз по сравнению с лампами накаливания. На упаковках КЛЛ декларируется срок службы до 12–15 тысяч часов, хотя на практике он может оказаться гораздо меньше, если лампу часто включают-выключают или используют в помещениях с высокой влажностью.

Широкий выбор цветовых температур от 2700 К (мягкий белый) до 6400 К (холодный белый) тоже можно отнести к достоинствам.

Отметим ещё пониженную пожароопасность, ведь люминесцентные лампы гораздо меньше нагреваются, чем лампы накаливания.

Перевешивают ли эти достоинства недостатки? Давайте посмотрим.

## **НЕДОСТАТКИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП**

Начнём с не самых главных.

Существенное неудобство для потребителя состоит в том, что после включения лампа не сразу набирает полную яркость свечения, а в течение пары минут, пока идёт разогрев газа.

Люминесцентные лампы нельзя использовать с обычными диммерами (регуляторами яркости), так как они перестают работать при понижении напряжения более чем на 10%.

В помещениях с высокой влажностью возможен пробой ЭПРА при включении. Не рекомендуется использовать обычные люминесцентные лампы и при отрицательных температурах (для этих условий нужны специальные морозоустойчивые варианты). Обычные КЛЛ максимальную светоотдачу имеют при комнатной температуре.

Имеется также проблема с покупкой качественных КЛЛ, ведь на упаковках зачастую сообщается неполная или даже недостоверная

информация, а на глаз вы не отличите лампу с высококачественным ЭПРА от варианта низкого качества.

Кроме того, через год-полтора становится заметна деградация люминофора: световой поток уменьшается, свет изменяет оттенок, в нём усиливается ультрафиолетовая составляющая. Указанный на упаковке большой срок службы это явление не учитывает.

Главных же недостатков — два.

Во-первых, это спектр, состоящий из довольно узких полос, в отличие от спектра солнца и ламп накаливания. Такой спектр вызывает повышенное зрительное утомление при чтении и тонкой работе. Окулисты отмечают, что острота зрения, измеренная в свете люминесцентных ламп, уступает остроте зрения при солнечном свете или свете ламп накаливания.

**Почему при свете КЛЛ хуже выполнять тонкую работу?**

**Дело в том, что фокусные расстояния линзы-хрусталика для синего и жёлтого света отличаются (так как коэффициент преломления синего света больше, чем жёлтого, — это называется хроматической aberrацией). Из-за этого изображения предмета на сетчатке в синих и жёлтых лучах не совпадают. Глаз фокусируется по жёлто-зелёной составляющей света, так что «жёлтое» изображение получается на сетчатке чётким, а «синее» чуть-чуть размытым. В солнечном свете жёлтый свет преобладает, так что «синее» размытие по краям изображения не особо мешает его восприятию. При свете некоторых КЛЛ, наоборот, жёлтого меньше, чем синего, и это делает изображение на сетчатке менее чётким.**

Наличие ультрафиолета и избыток синего света в спектре — палка о двух концах: с одной стороны, это может уменьшить «световое голодание» тёмной зимой, с другой — может представлять опасность для глаз. Дело в том, что для сокращения хрусталика нужна большая яркость именно жёлто-зелёного света, а на синий свет хрусталик так не реагирует. Когда сине-фиолетового света много, а жёлтого — мало, то хрусталик не чувствует опасности, не сокращается в достаточной

мере и не защищает сетчатку от проникновения опасных для неё лучей. Кроме того, электронный пускорегулирующий аппарат создаёт высокочастотное магнитное поле вблизи от неё (об опасности таких полей будет идти речь в следующей части книги). Особенно надо быть осторожными с КЛЛ в настольных светильниках, которые могут оказаться близко к голове. Рекомендуется располагать такие лампы не ближе 30 см от глаз.

Но самый главный недостаток — наличие ртути в газоразрядной трубке. Правда, в КЛЛ её всего 3–5 мг; если трубка разобьётся, заметного отравления парами не будет. И всё же попадание даже такого количества ртути в организм нежелательно. Опять-таки, остаётся проблема утилизации вышедших из строя ламп, а много ли у нас сознательных потребителей, готовых искать специальные пункты утилизации? Да и производители не всегда указывают на упаковках необходимость этого.

Именно из-за наличия ртутных паров с июля 2016 года всем государственным и муниципальным предприятиям и учреждениям РФ запрещено приобретать многие типы люминесцентных ламп, в том числе КЛЛ и лампы с ЭмПРА. А с 2018 года их начали постепенно выводить из оборота. Но мы ещё имеем шанс с ними встретиться: ведь множество светильников с люминесцентными лампами будет работать, пока не выработает свой ресурс, да и на складах имеется их хороший запас, так что они всё ещё продаются в магазинах. В 2020 году из всех проданных ламп люминесцентные составляли немногим менее 5%.

**Под запрет не попадают амальгамные люминесцентные лампы. В них ртуть находится в виде твёрдого сплава — амальгамы. Во время работы лампы амальгама выделяет пары ртути в трубку, а после выключения полностью поглощает её из объёма лампы.**

## **ГЛАВА 5. СВЕТОДИОДНЫЕ ЛАМПЫ**

Отказ от использования люминесцентных ламп стал возможен после выхода на арену в начале 2000-х ламп нового типа — светодиодных,

или led-ламп (от английского *light-emitting diode*), к разговору о которых мы и переходим.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ

Сначала о том, что такое светодиод. Это крохотный кристалл полупроводника, в одной половине которого создан путём добавления определённой примеси избыток свободных электронов, а в другой — наоборот, избыток «вакансий», так называемых дырок, которые с удовольствием захватывают свободные электроны. Это и есть светодиод. При пропускании через него тока нужного направления электроны прорываются через границу раздела двух областей и захватываются дырками. При каждом акте захвата выделяется квант света — фотон. Излучаемый светодиодом свет лежит в узком диапазоне спектра, в каком именно — зависит от химического состава светодиода.

В начале 1960-х были созданы светодиоды с красным свечением, в 1970-х годах — с зелёным и жёлтым. Но для получения белого света совершенно необходима ещё и синяя составляющая. Синие же светодиоды появились лишь 20 лет спустя, в 1993 году. С этого момента началась разработка осветительных светодиодных устройств, которые могут давать любой оттенок освещения, в том числе белый. Не удивительно, что за изобретение синих светодиодов японские учёные в 2014 году получили Нобелевскую премию.

Есть два основных способа получения белого света с помощью светодиодов.

Первый — объединить на одной матрице светодиоды трёх основных цветов: красного, зелёного и синего (технология RGB, как в цветном телевидении и фотографии). С точки зрения светоотдачи это самый выгодный вариант, но цветопередача получается не слишком хорошей, особенно для пастельных тонов. Поэтому в бытовых лампах RGB-технология не применяется, но используют её в световых панелях или лентах.

Второй способ — покрыть кристалл синего светодиода слоем люминофора, излучающего в жёлто-оранжевой части спектра. Часть синего света проходит сквозь люминофор и смешивается с его жёлто-оранжевым свечением. Такое сочетание глаз воспринимает как белый. В отличие от КЛЛ, люминофора требуется гораздо меньше, ведь светодиод очень компактен, поэтому можно использовать более доро-

гие люминофоры лучшего качества и увеличивать толщину слоя люминофора, улучшая итоговый спектр. Правда, энергоэффективность при этом несколько падает. Преимущество этого способа – хорошая цветопередача.

**Имеются и ультрафиолетовые светодиоды. Если желательно, чтобы излучатель имел ультрафиолетовую составляющую света, берут ультрафиолетовый светодиод и три слоя люминофоров, излучающих синий, зелёный и красный свет. Это похоже на получение белого света в люминесцентных лампах. В массовой продукции такие излучатели не используются.**

## **КАК УСТРОЕНА СВЕТОДИОДНАЯ ЛАМПА**

Один светодиод светит ярко, но из-за малых размеров имеет малую световую мощность. Светодиодная лампа содержит десятки кристаллов-светодиодов, размещённых на общей плате. Каждый кристалл покрыт люминофором. В некоторых моделях ламп с прозрачной колбой вы можете увидеть жёлтые квадратики – это и есть светодиоды, покрытые жёлтым люминофором. Яркий свет крохотных светодиодов слепит глаза, поэтому в большинстве ламп светодиодная плата закрыта пластиковым колпаком-рассеивателем, который равномерно распределяет свет во все стороны. От платы со светодиодами надо отводить теплоту, ведь при протекании тока через кристалл не вся работа электрического поля превращается в излучение – часть тратится на нагревание. Для теплоотвода лампы обычно снабжают алюминиевыми теплообменниками-радиаторами ребристой формы.

**Помимо ламп, популярны светодиодные ленты: один или несколько рядов светодиодов располагают на гибкой основе. Делают и светодиодные светящиеся панели различной площади.**

И неизменная часть типовых светодиодных ламп, которые включаются в сеть с напряжением 220 В, – встроенный в корпус лампы источник питания светодиодной платы: драйвер. Его задача – выпрямить и сгладить пульсации напряжения, чтобы питать светодиод по-

стоянным током. От качества драйвера зависит коэффициент пульсации лампы.

В дешёвых лампах драйвер может отсутствовать, вместо него применяется простой блок питания, не обеспечивающий стабилизации напряжения и тока. В миниатюрных лампочках драйвера нет по причине нехватки места внутри корпуса.

## ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА

Спектр светодиодных ламп с люминофором, которые используются для освещения, содержит синий пик — свет самих светодиодов — и непрерывный спектр излучения люминофора, захватывающий широкую область от зелёного до красного (рис. 18). Непрерывный характер спектра является большим преимуществом led-ламп перед КЛЛ. Но обратите внимание на ярко выраженный провал в области голубого света (480 нм), а это как раз та часть солнечного спектра, которая максимально представлена в спектре голубого неба и которая стимулирует выработку «гормона бодрости» серотонина. Проблема «заполнения провала» волнует разработчиков ламп, но до сих пор ещё не решена.

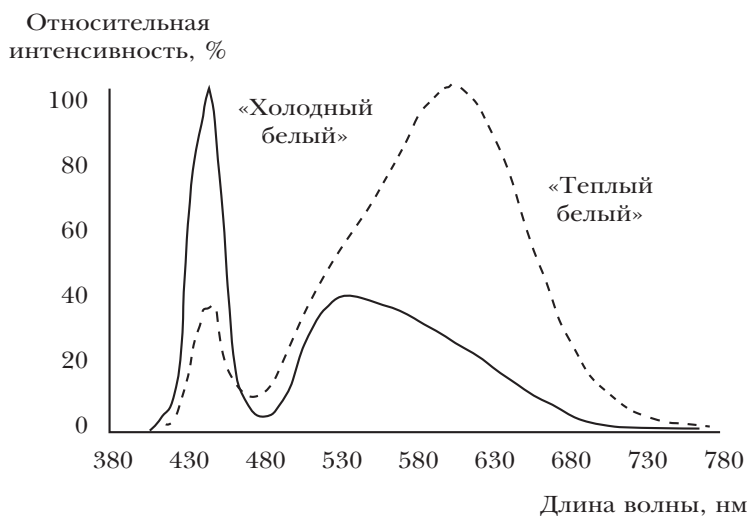


Рис. 18. Примерные спектры светодиодных ламп «холодного белого» и «тёплого белого» света

Главная же опасность света led-ламп — это синий пик на длине волны около 450 нм. Многие окулисты высказывают опасения, что этот

избыток синего света может вызвать помутнение хрусталика и даже спровоцировать повреждения сетчатки, особенно у детей, хрусталик которых особенно прозрачен для ультрафиолета. Проблема синего пика усугубляется нехваткой красного света в спектре led-ламп. Вы ведь помните: при нехватке красного требуется бóльшая интенсивность света для зрительного комфорта. Для увеличения интенсивности мы увеличиваем число ламп – и ещё больше возрастает мощность синего света.

Особенно опасно «ударное» воздействие синего света при резком переходе от темноты к свету, когда хрусталик расширен, а сетчатка не защищена чёрным пигментом. Замечали, как хочется зажмуриться при резком включении светодиодных или люминесцентных ламп в тёмном помещении? Поэтому лучше включать такие источники понемногу, постепенно увеличивая освещённость. Имейте это в виду по уграм.

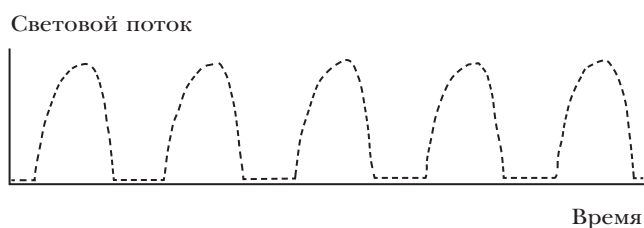
**Для поражения сетчатки глаз синим светом требуется в 10–100 раз меньшая энергетическая мощность, чем для аналогичного поражающего воздействия светом в более длинноволновом участке спектра.**

Приглушить синий пик можно, увеличивая толщину слоя люминофора. Правда, при этом КПД лампы понижается. В лампах «тёплого белого» света (цветовая температура меньше 3500 К) используется более толстый слой дорогого многокомпонентного люминофора с интенсивным излучением в жёлто-оранжевой области, и синий пик в спектре существенно меньше выражен, чем в лампах «дневного» (3500–5300 К) и «холодного белого» (выше 5300 К) света. К сожалению, процесс изготовления ламп «тёплого света» более сложен, и они дороже. Но самое главное: за два-три года работы люминофор успевает деградировать, и цветовая температура постепенно повышается. Лампа способна работать ещё несколько лет, но качество света будет всё хуже и хуже.

## **ПУЛЬСАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Коэффициент пульсации зависит главным образом от качества драйвера. Хорошие светодиодные лампы практически не пульсируют (коэффициент пульсации 1–2%). Дешёвый же драйвер вместо постоянного тока даёт на вы-

ходе выпрямленный ток частоты 50 Гц (то есть переменный ток в течение половины периода просто не пропускается). В итоге, купив дешёвую светодиодную лампу, вы можете иметь световой поток, зависящий от времени, как показано на рисунке 19. Коэффициент пульсации таких ламп приближается к 100%. Проблема в том, что рынки и магазины заполнены led-лампами с высоким коэффициентом пульсации. Большими пульсациями грешат и так называемые «кукурузные» лампы. Даже у одного и того же производителя могут выпускаться лампы как высокого, так и низкого качества.



*Рис. 19. Пульсации светового потока при питании светодиодной лампы выпрямленным напряжением*

Есть ещё один неприятный момент. Производитель заявляет на упаковке очень большой срок работы лампы (к примеру, 25 лет). Но электронные компоненты, входящие в состав драйвера (прежде всего электролитические конденсаторы), выходят из строя гораздо раньше, скажем, через два-три года, особенно если драйвер размещён в корпусе лампы и подвергается нагреву. И излучение лампы начнёт пульсировать! Это касается даже качественных ламп надёжных производителей. Так что проверяйте свои led-лампы время от времени с помощью камеры смартфона. И меняйте их, не дожидаясь окончания заявленного производителем срока работы.

## **ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП**

Преимущества многочисленны и существенны.

Светоотдача ещё больше, чем у люминесцентных ламп, и несравненно больше, чем у ламп накаливания. Она не менее 50 лм/Вт, а может достигать и 120 лм/Вт. Светодиоды позволяют в шесть-десять раз сократить потребление электроэнергии на освещение, если сравнивать их с лампами накаливания.

В отличие от люминесцентных, это экологичные источники света, не наносящие ущерба окружающей среде и не требующие расходов на утилизацию (как и лампы накаливания).

Они очень долговечны, причём число включений-выключений не влияет на срок службы. Но всё же не забывайте, что характеристики излучения изменяются по мере эксплуатации: световой поток уменьшается (как и у других типов ламп), цветовая температура растёт (как и у люминесцентных ламп), да ещё могут появиться пульсации.

Как и лампы накаливания, led-лампы включаются сразу на полную яркость (в отличие от КЛЛ).

Они влагостойки и нечувствительны к низким температурам (в отличие от КЛЛ), хотя высокие температуры светодиодам вредны. По умолчанию, рабочий диапазон температур от  $-30$  до  $+60$  °С.

Как и КЛЛ, светодиодные лампы менее пожароопасны, чем лампы накаливания, так как меньше нагреваются в процессе работы.

Есть и минусы.

Возможно неблагоприятное воздействие на хрусталик и сетчатку глаза из-за высокой интенсивности синей составляющей света, причём по мере использования лампы это воздействие усиливается вследствие деградации люминофора.

Надёжность электронных компонент драйвера может заметно уступать надёжности самих светодиодов, о чём производитель нас не предупреждает.

Главная же опасность – это наличие на рынке множества низкосортных дешёвых и не очень дешёвых ламп, несущих угрозу здоровью. Увы, реальные характеристики ламп зачастую не соответствуют тем, что указаны на упаковке: световой поток может быть существенно меньше, индекс цветопередачи ниже, а пульсации, несмотря на обещание их полного отсутствия, достигать 100%. И это касается не только дешёвой китайской продукции, но и продукции некоторых российских производителей.

Как бы там ни было, светодиоды продолжают активно завоёвывать мир. По мере развития технологий цены на эти лампы быстро снижаются и уже вполне радуют покупателя. Безусловно, светодиодным источникам света принадлежит ближайшее будущее.

**За пять лет, с 2016 по 2020, продажи led-ламп выросли в 2,2 раза и составили более половины полного количества проданных в 2020 году ламп.**

## **НЕМНОГО О МОНИТОРАХ**

Вот уже несколько десятилетий нам светят не только лампы, но и мониторы компьютеров. Мы сейчас не будем говорить о старых громоздких мониторах на основе электронно-лучевых трубок, а только о современных жидкокристаллических.

Качество картинки на ЖК-мониторе компьютера или ноутбука во многом зависит от тыловой подсветки монитора. А для подсветки используют либо люминесцентные лампы, либо белые светодиоды. В обоих случаях повышена интенсивность коротковолновой синей части спектра свечения, а в случае люминесцентной подсветки ещё и ультрафиолет присутствует. Дело усугубляется тем, что мы часами смотрим прямо в монитор, ничем не защищая глаза. А потом чувствуем их усталость, сухость и ощущение «песка в глазах», потерю чёткости изображения. Хуже того, воздействие синего света может привести к образованию катаракты или макулярной дегенерации сетчатки. Неслучайно число этих заболеваний последние годы возросло.

**Для тех, кто много работает за компьютером, разработаны очки со специальным покрытием, отражающим синюю-фиолетовую часть излучения экрана и немного снижающим его яркость.**

Пульсации излучения подсветки тоже вносят свой негативный вклад. Коэффициент пульсации особенно возрастает при понижении яркости экрана. При этом лампа подсветки начинает светить с перерывами, то есть мерцать – так технологически проще и дешевле (это называется ШИМ – широтно-импульсная модуляция). К счастью, есть и мониторы без ШИМ: в них уменьшение яркости подсветки достигается уменьшением яркости свечения самой лампы. У таких мониторов иногда в описании есть надпись Flicker-Free (без мерцания).

## ПОДВОДЯ ИТОГИ

Теперь, когда мы обсудили преимущества и недостатки доступных источников света, подумаем, как лучше организовать оптимальное освещение в своём доме. Главный принцип, на который мы должны опираться при этом, – не навреди. А самое опасное для зрения, особенно детского, – это когда много синего света и ультрафиолета.

Значит, первым делом проверяем, не остались ли в квартире старые люминесцентные лампы. Может, в ванной комнате, где мы обычно проводим полчаса перед сном? Нам ни к чему лишать себя гормона сна мелатонина из-за присутствующих в свете старых ламп синей и ультрафиолетовой составляющих. К тому же они наверняка сильно пульсируют из-за преклонного возраста.

Безусловно, самое безопасное для глаз решение – использовать в жилых комнатах старые добрые лампы накаливания (лучше максимально доступной мощности, а также галогенные). О цветопередаче тогда можно не беспокоиться, она практически идеальна, да и пульсации не опасны. Если это решение неприемлемо (например, из-за соображений экономии, а для жителей Европы и Америки оно просто недоступно), то покупаем лучшие светодиодные лампы тёплого света (с цветовой температурой не выше 3000 К) и каждую проверяем на пульсации с помощью камеры смартфона ещё в магазине. Надписям на упаковках доверять не стоит. И регулярно совершаем ревизию горящих в квартире ламп со смартфоном в руках. Свет пульсирует – зрение перенапрягается, глаза быстро устают и нервная система рыхляется. Поскорее избавляемся от пульсирующих ламп, не экономим. И помним, что диммеры усиливают пульсации. Для ослабления света лучше выключим часть ламп. И не забываем, что утро надо начинать с минимальной освещённости.

Обратим также внимание на конструкцию светильников: они не должны слепить глаза. Лучше, если свет направляется на белый потолок, рассеиваясь, и равномерно освещает комнату. Неприемлемый вариант – яркие точечные светильники. Смотреть на яркий источник света – это прямой путь к разрушению зрения, особенно детского. А сколько раз приходилось наблюдать картину в магазине: малыш лежит в коляске и таращит глаза на точечные светодиодные светильники на потолке. Родители, будьте бдительны!

Отдельная забота — организация освещения рабочего стола. Светодиодные лампы, как уже говорилось, должны быть удалены от головы минимум на 30 см. Опять-таки самый безопасный вариант — лампа накаливания.

Итак, после всего сказанного в данной части книги мы убедились, что свет Солнца — видимый, ультрафиолетовый и инфракрасный — активно воздействует на нас и совершенно необходим не только для зрения, но и для регуляции биологических ритмов. И пока что никакие искусственные источники света не могут полностью его заменить. Но наука продолжает развиваться, учёные пытаются не только совершенствовать светодиодное освещение, но и создать иные типы ламп, работающие на других физических принципах. Будем ждать и надеяться.

# ЧАСТЬ 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ЧЕЛОВЕК

*Человек, как и всё живое, эволюционировал в тесной взаимосвязи с условиями окружающей среды. Мы уже обсудили, насколько тонко наше зрение и гормональная система настроены на состав солнечного света у поверхности земли. Не менее удивительна наша связь с естественными электромагнитными полями. Но в современном мире эти поля почти полностью заглушены гораздо более сильными техногенными полями. Как это может отразиться на нашем здоровье? Об этом пойдёт разговор в третьей части книги. Но сначала вкратце остановимся на некоторых физических законах, которым подчиняются все электромагнитные явления.*

# ГЛАВА 1.

## ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

### РОЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МИРЕ

Для начала хочется, чтобы вы прониклись уважением к электромагнитному взаимодействию, к этой фундаментальной силе природы.

Вся известная нам материя Вселенной построена из частиц, имеющих электрический заряд: протоны и нейтроны ядер сделаны из заряженных кварков; заряженные ядра, удерживающие вокруг себя заряженные электроны, образуют атомы. И хотя атомы сами по себе электронейтральны, их объединение в молекулы тоже связано с взаимодействием входящих в их состав зарядов. Благодаря электрическому притяжению молекул образуются жидкие и твёрдые вещества, то есть и мы с вами. Благодаря электрическому отталкиванию молекул вы не проваливаетесь сквозь землю или сквозь стул. Можно смело сказать: всё вещество видимого мира существует в привычных формах благодаря электрическим зарядам. Электрическое взаимодействие (правильнее сказать, электромагнитное, как мы поймём в дальнейшем) — это то фундаментальное взаимодействие, которое создаёт весь окружающий мир. Второе «слагаемое», формирующее мир, — это гравитация, соединяющая огромные массы вещества в космические тела. Но наши тела какое-то время могут существовать и без гравитации, а вот без электромагнитного взаимодействия — ни одного мгновения!

Что же такое электрический заряд? Мы до конца не понимаем этого. Можно только сказать, что это фундаментальное свойство, изначально присущее фундаментальным частицам материи, как им присуща масса. Благодаря этому свойству — заряду — частицы участвуют в электромагнитном взаимодействии, законы которого физикам хорошо известны. Благодаря массе частицы участвуют в гравитационном взаимодействии.

**Несколько слов о фундаментальных частицах материи.**

**Согласно современной теории микромира — так называемой Стандартной модели — к фундаментальным (то есть**

несоставным частицам), помимо кварков и электронов, относятся не имеющие заряда нейтрино, а также два более массивных «двойника» электрона — мюон и таон. К тому же у каждой фундаментальной частицы есть своя античастица. Но для построения атомов хватает протонов с нейтронами (состоящими из самых лёгких кварков) и электронов. Остальные частицы рождаются в ядерных реакциях внутри атомов и внутри звёзд, а затем распадаются. Только легчайшие нейтрино живут сколь угодно долго и пронизывают всю Вселенную.

## **ЗАРЯДЫ. СТАТИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

Начнём с того, что есть заряд и антизаряд, но мы больше привыкли называть их положительным и отрицательным зарядами. При соединении равного количества заряда и антизаряда происходит их нейтрализация. Исторически сложилось так, что заряд электрона назвали отрицательным, а протона — положительным.

Одноименные заряды отталкиваются, а разноимённые — притягиваются, причём сила взаимодействия убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между зарядами. Это закон Кулона. Математически он очень напоминает закон всемирного тяготения Ньютона. Но надо отметить, что электрическое взаимодействие гораздо мощнее гравитационного. К примеру, сила электрического отталкивания двух электронов больше силы их гравитационного притяжения на таком же расстоянии в  $10^{43}$  раз! У такого числа и названия-то нет. Поэтому электрическое взаимодействие доминирует «в масштабах человека», а гравитационное взаимодействие становится заметным только при огромной массе хотя бы одного из тел.

Самое древнее, известное ещё древним грекам электрическое явление — электризация трением. При этом мизерная доля лёгких электронов переходит с одного тела на другое; тела заряжаются разноимённо и притягиваются друг к другу. Это явление называют также статическим электричеством. Кстати, не обязательно что-то специально натирать, статический заряд часто появляется без нашего желания: шагаешь по синтетическим коврам, съезжаешь с пластиковой горки, сни-

маешь синтетическую рубашку или шерстяной свитер, выходишь из автомобиля, наливаешь бензин из канистры – рождается статический заряд. А поднесёшь потом руку к батарее или к другому человеку, и вот вам микромолния, то есть электрический разряд – кратковременный ток через воздушный промежуток между телами. Разряд статического электричества для человека в принципе не представляет особой опасности. Но он неприятен. А иногда и пожароопасен. Так, при заправке автомобиля бензином из пластмассовой канистры могут воспламениться пары бензина.

**Из-за статического электричества предметы притягивают к себе пыль. Протрешь мебель сухой тряпкой — пыль тут же вернётся. Надо проводить влажную уборку, она снимает статический заряд с поверхности, и предмет становится ненаэлектризован на некоторое время.**

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Заряды чувствуют друг друга на расстоянии благодаря электрическому полю – особой материальной среде, возникающей вокруг каждого заряда. Первым об этом заговорил Майкл Фарадей в 1830 году, а ещё на сто лет раньше – российский физик Рихман, тот самый, который был убит молнией во время изучения грозы.

Электрические поля пронизывают буквально всё вокруг: они внутри атомов, между молекулами. Они окружают заряженные тела. Электрическое поле создаётся и самим земным шаром (об этом подробнее в следующей главе).

А что такое магнитное поле? Оказывается, когда заряды движутся, между ними возникает дополнительное, гораздо более слабое, взаимодействие. Если одноимённые заряды движутся в одну сторону, то будет дополнительное притяжение, в противоположные стороны – отталкивание. Это дополнительное взаимодействие движущихся зарядов называют магнитным взаимодействием. А так как оно очень слабое по сравнению с электрическим, то заметить его можно, либо когда заряды движутся очень быстро (почти со скоростью света), либо когда их очень много, причём положительных и отрицательных примерно

поровну. Так, упорядоченным движением электронов среди положительных ионов кристаллической решётки обусловлено магнитное взаимодействие проводов с током.

Движущийся заряд создаёт вокруг себя не только электрическое поле, но ещё и «довесок» к нему — магнитное поле. Это просто установившийся способ описывать единое явление: поле вокруг заряда — электромагнитное поле. Электрическое поле действует на любой заряд, магнитное — только на движущий заряд. Разделение единого поля на электрическую и магнитную составляющие — дань исторической традиции.

В дальнейшем нам понадобятся количественные характеристики полей. Величину электрического поля характеризует его напряжённость ( $E$ ), единицей её измерения является вольт на метр ( $V/m$ ). У магнитного поля есть разные характеристики и разные единицы их измерения, но чтобы не запутаться, мы будем использовать для его описания в этой книге магнитную индукцию ( $B$ ), единицей измерения которой является тесла ( $Tл$ ).

**Электрическая напряжённость  $E = 1 V/m$  — это небольшая величина. Когда возникает пробой воздуха при статическом разряде, напряжённость в месте искры достигает трёх миллионов вольт на метр. А вот магнитная индукция  $B = 1 Tл$  — это очень сильное магнитное поле. Такая индукция характерна для сильных постоянных магнитов, применяемых в электродвигателях и генераторах. Магнитные поля от 1 до 3 Тл используются в медицине при МРТ (магниторезонансной томографии).**

Для понимания дальнейшего подчеркнём ещё раз: магнитное поле всегда возникает вокруг проводов с током. Все электрические приборы питаются током. Чем больше ток (то есть чем больше мощность, потребляемая электрическим прибором), тем более сильное магнитное поле он создаёт вокруг себя. Естественно, это поле с расстоянием убывает.

А откуда же берётся поле постоянных магнитов, ведь мы не пропускаем через них токи? Ещё Ампер в 1820 году догадался, что оно воз-

никает от упорядоченных атомных микротоков, похожих на крохотные круговые виточки. Чтобы все микротоки были одинаково ориентированы, магнит надо намагнитить, поместив во внешнее магнитное поле. Способностью сильно намагничиваться обладают ферромагнетики: железо, кобальт, никель и редкоземельные металлы. При нагревании выше определённой температуры эти вещества теряют свои магнитные свойства.

Магнитное поле Земли, как предполагают, порождается круговым током, циркулирующим во внешнем жидком ядре из-за вращения Земли.

В наших телах тоже имеются свободные (способные куда угодно двигаться) заряды и токи. Носителями заряда являются нейроны, а в разных клетках организма и в крови присутствуют ионы металлов, в том числе железа. Все эти компоненты создают собственные электрические и магнитные поля, характерные для разных органов, и реагируют на внешние поля. Мы получаем информацию об электрической активности сердца с помощью электрокардиограмм, мозга — электроэнцефалограмм. Много информации о сердце и мозге могут дать магнитограммы.

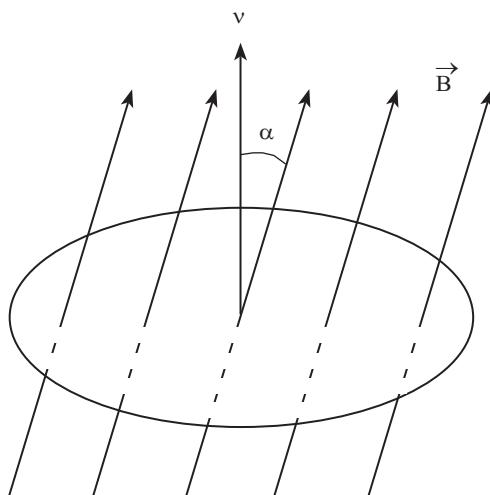
**Более ста лет физики не знали, что же представляет собой эта таинственная субстанция — электромагнитное поле, — хотя прекрасно изучили законы, которым оно подчиняется. В середине XX века квантовая электродинамика раскрыла тайну электромагнитного поля: оно состоит из «супа» виртуальных фотонов и виртуальных электронно-позитронных пар, непрерывно рождающихся и исчезающих в пространстве вокруг заряженной частицы.**

## **ИНДУКЦИОННЫЕ ТОКИ**

Все знают, что для получения тока в цепи надо, чтобы в цепи присутствовал источник напряжения, например аккумулятор или батарейка. Но Фарадей обнаружил, что можно получить ток в проводящем контуре безо всяких источников! Надо только, чтобы магнитный поток через этот контур изменялся по любым причинам. А что такое

магнитный поток? Это, грубо говоря, произведение магнитной индукции на площадь, ограниченную контуром. Но важна также и ориентация контура относительно магнитного поля. Чтобы магнитный поток изменялся, можно или менять само магнитное поле в месте нахождения контура, или поворачивать контур в неизменном магнитном поле. По этому принципу работает генератор переменного тока: рамку, состоящую из многих витков, вращают между полюсами магнита, или, наоборот, магнит вращают вокруг неподвижной рамки. В обоих случаях через витки рамки течёт ток — тот самый переменный ток, которым мы активно пользуемся. Такой ток, созданный путём изменения магнитного потока, называют индукционным. Чем быстрее изменяется магнитный поток, тем больше величина индукционного тока. Это суть закона электромагнитной индукции Фарадея.

**Если линии магнитной индукции составляют угол  $\alpha$  с направлением нормали к площадке  $S$ , то магнитный поток через эту площадку равен  $BS \cdot \cos\alpha$ . Изменение магнитного потока в электрогенераторах достигается за счёт изменения угла  $\alpha$  при вращении рамки.**



Но каким образом изменяющееся магнитное поле заставляет двигаться электроны в неподвижном проводнике? Ведь на неподвижные (в среднем) заряды магнитные поля не действуют. Размышляя над

этой загадкой, Максвелл пришёл к выводу: изменяющееся со временем магнитное поле порождает вихревое электрическое поле, то есть поле, линии напряженности которого замкнуты сами на себя. Оно-то и приводит в движение электроны в проводящем контуре, создавая индукционный (или вихревой) ток.

При протекании любого тока, в том числе индукционного, проводник нагревается. Мы используем разогрев индукционными токами в индукционных электроплитах: токовые катушки создают сильное переменное магнитное поле высокой частоты, возбуждающее индукционные токи в посуде со специальным ферромагнитным слоем на дне. Вот и получается: сама конфорка холодная, а посуда на ней вместе со своим содержимым нагревается.

Забегая вперёд, отметим, что индукционные токи — один из главных механизмов воздействия на нас переменных магнитных полей, особенно высокочастотных.

## ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Электрическое и магнитное поля тесно связаны друг с другом. Подобно тому, как изменяющееся магнитное поле порождает электрическое, изменяющееся электрическое поле порождает магнитное.

Итак, электрическое поле создаётся не только зарядами, но и изменяющимся магнитным полем. Магнитное поле создаётся не только токами, но и изменяющимся электрическим полем. Этот процесс взаимного порождения полей, начавшись в некоторой точке пространства, распространяется от точки к точке всё дальше и дальше — это и есть электромагнитная волна.

Электромагнитные волны были предсказаны Максвеллом на основе полной системы уравнений, описывающей эти поля (уравнений Максвелла), и обнаружены экспериментально Генрихом Герцем в конце XIX века.

**Более полувека физики не верили в существование электрического и магнитного полей, предсказанных Фарадеем. Построение полной теории электромагнитных полей Максвеллом (1865 г.) не убедило их в реальности существования полей. Только после опытов Генриха Герца**

**(1888 г.) по излучению и приёму электромагнитных волн электромагнитные поля стали рассматриваться как объективная реальность.**

Как же «запустить» в пространство электромагнитную волну? Ответ: для этого надо заставить заряды в каком-то месте двигаться с ускорением, и из этого места и начнёт распространяться электромагнитная волна. Чем больше ускорение, тем больше интенсивность волны. Один из способов сообщить ускорение зарядам – это заставить их колебаться туда-сюда с большой частотой. Чем больше частота колебаний, тем больше ускорение (оно пропорционально квадрату частоты) и больше интенсивность излучения (она пропорциональна квадрату ускорения, то есть частоте в четвёртой степени). На этом принципе основано излучение всех антенн: от смартфона до радиовещания.

Подчеркнём: чтобы интенсивность излучения электромагнитных волн была хоть сколько-то ощутима, частота колебаний в антенне должна быть очень большой – десятки килогерц и больше. На технической частоте 50 Гц никакого электромагнитного излучения нет! Иногда говорят: проводка или прибор, работающий на переменном токе, излучает электромагнитное поле. Это не совсем корректно: вокруг проводов проводки есть электромагнитное поле, но никакие волны она не излучает. Излучают радиоантенны, смартфоны и базовые станции, микроволновые печи, беспроводные наушники, радионяни, Wi-Fi роутеры и так далее.

Чем больше частота, тем меньше длина волны, как и для звуковых волн. Самые короткие радиоволны с длиной волны (в воздухе) от 1 мм до 1 м называют микроволнами, их частоты лежат в пределах от 30 МГц (мегагерц, то есть миллионов герц) до 300 ГГц (гигагерц, то есть миллиардов герц). Микроволны излучают любимые нами гаджеты, роутеры, микроволновки. Ещё более короткие волны – это уже инфракрасное излучение, источником которого являются все нагретые тела (мы сами создавая излучатели таких больших частот не умеем).

На этом завершим наш краткий экскурс в науку электродинамику и поговорим о тех естественных электромагнитных полях, в которые мы были погружены в доиндустриальную эпоху, пока они не были сильно искажены достижениями нашей технической цивилизации.

## ГЛАВА 2. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Земной шар обладает собственными электрическим и магнитным полями, а ещё вблизи поверхности Земли наблюдается некий фон электромагнитных волн низких и сверхнизких частот. Итак, по порядку.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Земля — это огромный заряженный шар, имеющий большой отрицательный заряд (почти полмиллиона кулон). Но из космоса этот заряд не заметен, так как он компенсируется таким же по величине положительным зарядом, сосредоточенным, в основном, в ионосфере на высоте около 50 км от земной поверхности; избыток положительных ионов имеется также в нижних слоях атмосферы. В целом Земля со своей атмосферой имеют нулевой суммарный заряд.

Но около поверхности земли имеется электрическое поле. В ясную погоду над пустынной равниной его средняя напряженность равна 100–130 В/м, над океанами 80–90 В/м. Почему мы говорим о пустынной равнине? Потому что присутствие предметов и живых существ сильно изменяет земное электрическое поле. С высотой электрическое поле Земли быстро убывает (так, на высоте 1,5 км оно уже в 4 раза слабее) и исчезает на расстоянии 50–60 км от поверхности.

Заряд Земли и её поле изменяются в течение суток: они минимальны в 3–4 часа по Гринвичу и максимальны около 19 часов — на всей Земле!

Из-за избытка положительных ионов в воздухе к земле постоянно течёт слабый ток. Полный ток, достигающий поверхности земли, равен 1800 А, то есть каждую секунду отрицательный заряд Земли уменьшается на такое же количество кулон. Казалось бы, из-за этого Земля должна быстро потерять свой заряд, однако этого не происходит. В чём же причина?

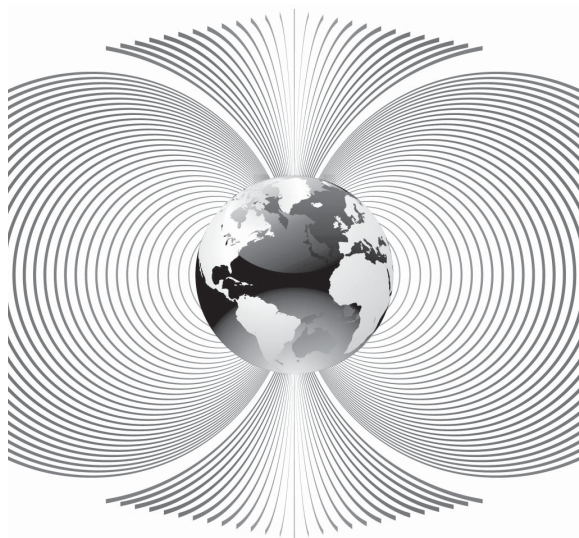
Разгадку подсказал тот факт, что около 19 часов по Гринвичу достигает максимума степень грозовой активности на всей Земле (в основном это тропические грозы) — тогда же, когда максимально электрическое поле Земли. Именно молнии снабжают Землю отрицательным зарядом. Слабые атмосферные токи разряжают Землю, а молнии заряжают. В среднем в Землю бьёт 60–100 молний в секунду, и каждая молния приносит отрицательный заряд до 20 Кл.

Так выглядит сильно упрощённая картина. По современным представлениям электрическое поле Земли связано со множеством процессов, происходящих в атмосфере, ионосфере и даже магнитосфере Земли, и все эти процессы объединяют общим понятием – Глобальная электрическая цепь.

**Во время грозы электрическое поле под грозовым облаком меняет своё направление на противоположное, а его напряженность достигает 100 тысяч В/м.**

## ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Земля обладает весьма сильным магнитным полем по сравнению с другими планетами земной группы. Вблизи Земли оно имеет такой вид, будто внутри земного шара находится постоянный полосовой магнит, ось которого на  $10^\circ$  отклонена от оси вращения Земли. Соответственно, магнитные полюса отстоят от географических на 2–3 тысячи км. Как уже говорилось, этот магнит образован токами во внешнем жидком ядре Земли. Схематично геомагнитное поле вблизи Земли изображено на рис. 19.



*Рис. 19. Линии индукции магнитного поля вблизи Земли*

Линии индукции магнитного поля – это как раз те воображаемые линии, вдоль которых выстраиваются стрелки компасов. Там, где линии гуще, магнитное поле сильнее. Из рисунка мы видим, что вблизи полюсов магнитное поле более сильное, чем вблизи экватора. Индукция геомагнитного поля составляет десятки микротесла (миллионных долей тесла: мкТл), и это в тысячи раз меньше, чем локальные магнитные поля, создаваемые обычными бытовыми приборами.

**На экваторе магнитная индукция в настоящее время равна 34 мкТл, на широте Москвы 50 мкТл, вблизи полюсов около 66 мкТл.**

В области Курской магнитной аномалии магнитное поле 100 мкТл. Геомагнитное поле в тысячи раз слабее поля постоянного магнита, который вы можете купить в магазине.

Магнитное поле, создаваемое токами в ядре, называют главным, и его вклад в общее поле составляет 95%. Есть ещё аномальное поле, создаваемое намагниченными горными породами, и внешнее геомагнитное поле, связанное с солнечно-земными взаимодействиями (о нём поговорим чуть позже).

На большом расстоянии от Земли геомагнитное поле несимметрично: со стороны Солнца оно «сплющено» и простирается на 10 земных радиусов, а в направлении от Солнца магнитное поле образует шлейф, тянущийся на сотни тысяч километров – дальше орбиты Луны. Такая форма возникает из-за солнечного ветра. Солнечный ветер – это непрерывный поток высокоэнергетичных заряженных частиц, главным образом протонов и электронов. Эти заряженные частицы захватываются и удерживаются магнитным полем Земли, как в ловушке. Их траектории «наматываются» на линии поля, и частицы кочуют от одного полюса к другому, постепенно растрачивая свою энергию в столкновениях с молекулами атмосферы. Ближе всего они приближаются к Земле в районе полюсов, и мы видим их атаки как полярные сияния.

Области околоземного пространства с повышенной концентрацией захваченных заряженных частиц образуют радиационные пояса Земли, которые окружают Землю подобно кольцам. Таких поясов два.

Внутренний радиационный пояс находится на высоте четырёх тысяч километров от поверхности Земли и состоит в основном из протонов. Внешний пояс, расположенный на высоте 17 тысяч километров, состоит в основном из электронов. Содержимое радиационных поясов постепенно «протекает» в атмосферу, но продолжает постоянно пополняться от Солнца.

Без защиты магнитного поля с его радиационными поясами жизнь на поверхности Земли была бы невозможна. Да и саму атмосферу рано или поздно «сдуло» бы солнечным ветром, как это произошло у Марса, когда он лишился своего магнитного поля.

## **КОГДА МАГНИТНЫЕ ПОЛЮСА МЕНЯЮТСЯ МЕСТАМИ**

Прямые измерения магнитного поля проводятся всего 400 лет, а о далёких временах мы узнаём, анализируя намагниченность горных пород. Оказалось, что главное геомагнитное поле не совсем стабильно: есть вековые колебания, длящиеся столетиями, а изредка случаются «геомагнитные рывки» продолжительностью не больше года. Это всё так или иначе связано с токами в ядре. Но самое интересное, что примерно раз в миллион лет северный и южный магнитные полюса меняются местами, то есть происходит инверсия магнитных полюсов. Процесс это небыстрый, длящийся несколько тысяч лет, и в течение какого-то времени геомагнитное поле становится очень слабым, так что всё живое на Земле оказывается под угрозой. Последняя такая инверсия произошла около 770 тысяч лет назад.

Возможны также ситуации, когда полюса меняются местами на короткое время порядка сотен лет, а потом возвращаются обратно. Последнее такое событие произошло 42 тысячи лет назад («событие Лашамп»). Магнитное поле имело противоположное направление в течение примерно 440 лет, а переходные периоды длились по 250 лет. Во время переходов магнитная индукция составляла всего 5–10% от обычной! Космические частицы, проникая в атмосферу, разрушали озоновый слой, что привело к увеличению потока ультрафиолета. Древние люди вынуждены были прятаться в пещерах. Предполагают, что неандертальцы не выдержали конкуренции с гомо сапиенс в борьбе за пещеры. Серьёзные климатические изменения на Земле, вымирание мамонтов и мегафауны Австралии тоже связывают с этим событием.

**Магнитные полюса всегда находятся в движении. Но с 1990-х движение северного магнитного полюса ускорилось в четыре раза. За последние 150 лет геомагнитное поле уменьшилось на 10%. Эти изменения происходят неравномерно: где-то поле ослабевает сильнее, а где-то даже усиливается. Учёные опасаются нового «события Лошамп».**

## **МАГНИТНЫЕ БУРИ**

При вспышках на Солнце миллиарды тонн плазмы (заряженных протонов, ядер гелия и электронов) выбрасываются в космос. Если выброс попадает в Землю (это может произойти через два-три дня после вспышки), геомагнитное поле испытывает возмущения. В магнитно-спокойные дни вариации геомагнитного поля во много тысяч раз меньше постоянно действующего поля, а во время сильных вспышек всплески магнитных полей увеличиваются в десятки раз, их величина достигает 1% от стационарного поля — это так называемые магнитные бури. При буре земное поле меняется с амплитудой в сотые доли мкТл в минуту (напомню, что в Москве магнитная индукция стационарного поля 50 мкТл). Сильные магнитные бури возникают в основном в активной фазе солнечного 11-летнего цикла. В годы минимума солнечной активности мы имеем лишь несколько бурь в течение года, при максимумах солнечной активности — до 50 бурь в год. Фаза нарастания магнитных возмущений длится около семи часов, а возвращение поля к исходному состоянию занимает около трёх суток. Это означает, что в годы активного солнца мы чуть ли не половину времени живём в условиях умеренных и сильных бурь.

Хотя относительная величина магнитных всплесков на первый взгляд не впечатляет, они несут угрозу высокотехнологичной инфраструктуре и могут выводить из строя космические аппараты.

**Самая мощная в истории наблюдений геомагнитная буря произошла в 1859 году, то есть больше 160 лет назад. Тогда северное сияние можно было увидеть даже на широте Кубы. Телеграф вышел из строя по всей Европе и Северной Америке на несколько дней. По оценкам, амплитуда всплесков**

**достигала 0,9 мкТл. В нашу высокотехнологичную эпоху такое событие нанесло бы колоссальный ущерб экономике! К счастью, антарктические ледяные керны свидетельствуют, что столь сильные магнитные бури происходят раз в 500 лет.**

Действуют ли магнитные бури на людей? Исследования дают противоречивые результаты. С одной стороны, есть свидетельства служб скорой помощи, что в течение одного-двух дней после начала бури возрастает число обращений людей с сердечно-сосудистыми проблемами. Однако строгими статистическими расчётами эти утверждения не подкреплены. Исследователям всё же удалось выявить статистически значимый тренд, связывающий геомагнитные бури с усилением психотической депрессии у мужчин. Также удалось экспериментально подтвердить, что работа сердечно-сосудистой системы зависит от геомагнитной обстановки.

В целом, российские учёные склонны допускать, что магнитные бури влияют на здоровье человека (хотя механизмы такого влияния до сих пор неясны), а западные и американские учёные отвергают эту идею. Так или иначе, исследования о воздействии солнечных вспышек на людей продолжаются.

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В АТМОСФЕРЕ**

До сих пор мы говорили о стационарных электромагнитных полях и их случайных возмущениях. Но есть ещё один постоянно действующий фактор – это стоячие электромагнитные волны низких и сверхнизких частот, так называемые резонансы Шумана (в честь профессора Мюнхенского университета В. Шумана, теоретически предсказавшего их в 1952 году).

Дело в том, что пространство между Землёй и ионосферой представляет собой гигантский электромагнитный резонатор. Подобно звуковым резонаторам, он усиливает колебания с определёнными частотами, зависящими от размеров и формы резонатора. Основные собственные частоты электромагнитного резонатора Земля-ионосфера лежат в диапазоне от 7,83 до 50 Гц (сейчас известно восемь частот Шумана, их округлённые значения: 8, 14, 20, 26, 32, 39, 45 и 50 Гц). Ионосферный резонатор постоянно возбуждается и подпитывается энергией от молний, бьющих каждую секунду в Землю.

Человек, как и всё живое, сформировался в полости этого резонатора. И не случайно основные шумановские частоты соответствуют диапазонам альфа- и бета-волн мозга человека. Наиболее интенсивной является шумановская волна со средней частотой 7,83 Гц, соответствующая альфа-диапазону мозговых волн человека (7,5–13 Гц). Интересно, что не только у человека, но и у большинства живых существ, независимо от размера мозга, в электрической активности мозга доминирует частота около 8 Гц.

Шумановские волны необходимы для синхронизации биоритмов всего живого на Земле. Эксперименты по стимуляции мозга волнами различной частоты показали, что частота 7,83 Гц способствует переходу из активного бодрствования в спокойное, умиротворённое состояние. Стимуляции в бета-диапазоне (14–30 Гц) повышают умственную активность и внимание. У добровольцев же, помещённых в бункеры, отражающие шумановские волны, через три недели развивались эмоциональные нарушения и мигрени.

Между тем городские жители постоянно находятся в такого рода «бункерах»: ведь интенсивность шумановских волн столь невелика, что они практически полностью заглушаются электромагнитным смогом городов.

**На ночной стороне Земли ионосфера редееет, из-за чего интенсивность шумановских волн ночью уменьшается в пятьдесят раз. Возможно, вследствие этого ночью у бодрствующих людей снижается скорость реакции и способность к абстрактному мышлению.**

## **ГЛАВА 3. ЧЕЛОВЕК В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

Электромагнитное поле Земли воздействует на всю живую и неживую природу. Состояние геомагнитного поля влияет на климат и погоду. Геомагнитное поле намагничивает почвы, что сказывается на скорости роста растений. С помощью геомагнитного поля многие виды перелётных птиц, насекомых и членистоногих безошибочно опреде-

ляют направление движения на тысячи километров (хотя нет единой точки зрения на то, как именно они это делают).

А насколько существенно воздействие электромагнитных полей (сокращённо ЭМП) на человека? И как сказывается на нашем здоровье всё возрастающий фон техногенных полей? Уже накоплен обширный экспериментальный материал на эту тему. И всё же вопросов здесь остаётся гораздо больше, чем ответов.

## **ЧЕЛОВЕК КАК ИСТОЧНИК ПОЛЕЙ**

В основе всех функций организма лежат электромагнитные взаимодействия. Жизнедеятельность сопровождается генерацией электрических полей и протеканием в тканях слабых электрических токов. Биотоки создают распределение электрических потенциалов по поверхности тела. Регистрация этих потенциалов давно уже используется в медицине — это электрокардиография и электроэнцефалография.

Биотоки порождают также биомагнитное поле, существующее внутри и за пределами тела. Другой источник магнитных полей человека — мельчайшие ферромагнитные частицы (которые сами по себе могут быть намагничены), случайно попавшие или специально введённые в организм, например с целью диагностики или терапии.

Биомагнитное поле в миллионы и миллиарды раз слабее геомагнитного, и учёные научились измерять его только в 1970-х годах с помощью сверхпроводящих сквид-магнитометров. Тогда и возникло новое научное направление — биомагнетизм. Регистрируя зависимость от времени магнитного поля сердца или мозга (то есть снимая магнитокardiограммы и магнитоэнцефаллограммы), врачи могут диагностировать те или иные заболевания. Какие-то процессы лучше видны на электрограммах, а какие-то — на магнитограммах. Каждый орган генерирует своё магнитное поле. Самое сильное биомагнитное поле создаётся сердцем. Интересно, что магнитное поле глаз сильнее, чем магнитное поле мозга (это связано с работой сетчатки).

**Если вы съели консервы из жестяной банки, сквид-магнитометры обнаружат ферромагнитные частицы у вас в желудке. У сварщиков такие частицы регистрируются в лёгких.**

## **ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ПОЛЕЙ**

Живые организмы не только создают собственные электромагнитные поля, но и отзываются на воздействие внешних полей. То, что восприимчивость к магнитному полю есть не только у птиц, но и у людей, доказано прямыми экспериментами. Хотя данные об изменениях внешнего магнитного поля в сознание человека не попадают, на электрической активности мозга в альфа-диапазоне эти изменения отражаются. По вопросу о механизмах влияния ЭМП на людей имеются разногласия, но несомненно, что одним из главных механизмов воздействия магнитного поля является индуцирование токов внутри тела. Индукционные токи текут между клетками, стимулируя нервные и мышечные ткани. Наиболее чувствительна к электромагнитным полям нервная система, но магнитное поле воздействует и на кровеносно-сосудистую систему (красные кровяные тельца способны сильно намагничиваться), на эффективность переноса кислорода кровью, транспортировку питательных веществ.

Естественное геомагнитное поле в значительной мере определяет состояние наших внутренних магнитных полей. Когда же в этот процесс взаимодействия вмешиваются искусственные источники ЭМП, по интенсивности во много раз превосходящие естественные поля, происходит нарушение синхронизации. Человек не ощущает ЭМП напрямую, и явно заметного вреда чужеродные поля не приносят, но при длительном воздействии они уменьшают нашу способность адаптироваться к другим неблагоприятным факторам, снижают иммунитет и работоспособность. Специалисты Института биофизики РАН на основании своих исследований пришли к выводу: следствием воздействия техногенных электромагнитных полей может стать синдром раннего старения организма. Его признаки: ухудшение памяти и работоспособности, снижение иммунитета, нарушение репродуктивной функции и развитие других возрастных патологий в более ранние годы.

**Техногенные электромагнитные поля уже стали значимым экологическим фактором. В 1995 году Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) ввела термин «глобальное электромагнитное загрязнение окружающей среды»**

**и включила эту проблему в перечень приоритетных для человечества. Практически все развитые страны реализуют свои национальные программы исследования биологического действия ЭМП и обеспечения безопасности человека.**

Серьёзные исследования воздействия электромагнитных полей и радиоизлучений на организм человека начались ещё в СССР в 1960-х годах, когда держава готовилась стать лидером в освоении космического пространства. Ведь при полётах к Луне и другим планетам экипаж будет лишён постоянного геомагнитного поля и атакован космическими лучами (более подробный разговор о которых мы будем вести в четвёртой части книги). Как вариант защиты от космической радиации рассматривается создание мощного искусственного магнитного поля. Кроме того, значительный электромагнитный фон создаёт работающая аппаратура корабля. Эти же факторы будут действовать на лунной или марсианской базе. Как всё это может сказаться на здоровье, особенно при длительном воздействии?

Посмотрим, что же известно о влиянии полей различной интенсивности и частоты на людей.

## **КОГДА ПОЛЯ ОСЛАБЛЕНЫ**

Биологическое действие наблюдается не только при усилении, но и при ослаблении электрического и магнитного полей. Тут важна степень изменения полей по сравнению с их естественными значениями. Более того, ослабление поля действует хуже, чем усиление, к которому до определённого предела организмы адаптируются.

Так, при экранировании от электрического поля у мышей и крыс обнаружили нарушения регуляции обмена веществ и рост смертности через три недели эксперимента. Но изменения были обратимы и проходили при включении «электрического душа» — немного усиленного искусственного электрического поля.

Заметим: в жилых помещениях со стальной арматурой земное электрическое поле ослаблено в 10–100 раз. Скорее «под душ», на природу!

Достаточно много фактов накоплено по магнитной депривации. Так, у крыс при ослаблении в 500 раз геомагнитного поля происходи-

ли дегенеративные изменения внутренних органов, а также сильно возростала агрессивность. У людей-добровольцев, находившихся в сильно ослабленном магнитном поле в течение десяти суток, не обнаружили каких-либо отклонений в самочувствии и здоровье. Но более длительное отсутствие геомагнитного поля, вероятно, может вызвать более серьёзные последствия.

В середине XX века японский учёный и врач Киочи Накагава описал новую болезнь «синдром дефицита магнитного поля человека». Он убедительно показал, что у человека магнитная депривация проявляется в ухудшении сна, снижении иммунитета, быстрой утомляемости и нервозности. Геомагнитное поле ослаблено в подземных помещениях (метро, туннелях), в домах с бетонными и монолитно-каркасными стенами и перекрытиями (из-за наличия стальной арматуры). Санитарные правила и нормы (СанПин) устанавливают предельно допустимый уровень (ПДУ) ослабления геомагнитного поля в жилых зданиях: 1,5 раза.

**Эффект ослабления геомагнитного поля сильнее всего выражен в крупнопанельных домах, особенно на высоких этажах, где предельно допустимый уровень ослабления может быть превышен в два-три раза. В зданиях, построенных по монолитно-каркасной технологии, коэффициент ослабления обычно не превышает ПДУ. В кирпичных домах с бетонными перекрытиями ослабление ещё меньше. Но лучше всего в этом отношении деревянные дома.**

В стальной коробке автомобиля, трамвая, поезда, самолёта, корабля геомагнитное поле ослаблено примерно в 50 раз! Это одна из причин, по которой длительные поездки утомляют.

Лечиться от электрической и магнитной деприваций очень просто: почаще бывать на природе.

## **ПОСТОЯННЫЕ ТЕХНОГЕННЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ**

Мы ежедневно встречаемся с постоянными магнитными полями, во много раз превышающими земное поле, в обычных бытовых устройствах: микроволновых печах (там целых два постоянных магни-

та), компьютерах, наушниках, смартфонах, акустических системах, видеоплеерах, электромоторах... Что же известно о действии на человека сильных постоянных магнитных полей?

**Для ориентировки: стрелка компаса начинает реагировать на источник магнитного поля индукцией 0,03 Тл с расстояния 15 см.**

В отличие от внешних электрических полей, магнитные поля практически полностью проникают в тело, так что весь организм испытывает их воздействие. Вопрос об их опасности или безопасности всё ещё остаётся открытым. Известно, что кратковременное воздействие сильных магнитных полей (до нескольких Тл) человек переносит без явных патологических последствий. Например, во время процедуры МРТ (магниторезонансная томография) вы подвергаетесь действию стационарного поля от 0,01 до 3 Тл. При повороте головы в поле выше 2 Тл может возникнуть головокружение и тошнота, и виновато в этом явление электромагнитной индукции.

Ещё много веков назад постоянные магниты прикладывали к ранам и ушибам, ноющим суставам и зубам для облегчения боли и снятия воспаления. Сейчас во многих странах, особенно в Японии, популярны магнитные аппликаторы и браслеты, которые создают довольно сильные магнитные поля: от 0,01 Тл до 0,2 Тл, причём носят эти магнитные браслеты по восемь-десять часов. В ряде стран, в том числе в СССР и затем в РФ, используется магнитотерапия: лечение постоянными, импульсными или низкочастотными полями. Однако в других странах, например в США, магнитотерапия считается псевдонаучным методом с недоказанной клинической эффективностью. Но как бы там ни было, ежегодные мировые обороты индустрии магнитотерапии превышают миллиард долларов.

Санитарные правила и нормы (СанПин) не устанавливают предельно допустимых уровней (ПДУ) для постоянных полей в быту, ограничения есть только для рабочих мест. Так, для длительного пребывания (1–8 часов) установлен ПДУ постоянного магнитного поля 0,01 Тл (10 тысяч мкТл, то есть в 200 раз больше естественного геомагнитного поля на широте Москвы), при кратковременном (до 10 минут) —

0,03 Тл. При кратковременном локальном действии (на отдельную часть тела) разрешены поля до 0,05 Тл. Заметьте: магнитные браслеты могут создавать локальные поля до 0,1 Тл! Так что хорошо подумайте, прежде чем долго их носить.

При желании вы можете придерживаться рекомендации Международной ассоциации радиационной защиты (IRPA): для населения постоянно действующее техногенное магнитное поле не должно превышать 100 мкТл (0,0001 Тл) — это вдвое больше геомагнитного поля на широте Москвы. Чтобы быть спокойным на этот счёт, не стоит, к примеру, ставить у изголовья кровати устройства, содержащие сильные постоянные магниты.

**ВОЗ считает, что имеющихся на сегодня данных о возможных долгосрочных или отсроченных последствиях воздействия на людей постоянных магнитных полей недостаточно для окончательных выводов. Проблема требует дальнейших исследований.**

Поговорим теперь о переменных полях.

## **ВЛИЯНИЕ ПОЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ**

Среди всех переменных полей со сверхнизкими частотами (такowymi считаются частоты до 300 Гц) особое положение занимают поля технической частоты 50–60 Гц, потому что мы буквально купаемся в них в повседневной жизни. Эти поля создаются электропроводкой, всеми бытовыми приборами, питающимися от сети переменного тока, линиями электропередач, трансформаторными подстанциями. На переменном токе технической частоты работает железнодорожный транспорт (городской же транспорт на электротяге использует постоянный ток).

Вспомним ещё раз закон электромагнитной индукции: изменения магнитного потока создают индукционные электрические поля и токи. При постоянном магнитном поле изменения магнитного потока могут возникать при ваших движениях и поворотах, но это будут медленные изменения! При полях порядка геомагнитного или чуть более сильных индукционные токи чрезвычайно малы. Другое дело — пере-

менные магнитные поля технической и более высоких частот. Они индуцируют гораздо более сильные электрические поля и токи в организме, которые воздействуют на нервы и мышцы. У человека может увеличиться частота пульса, начать болеть голова. Всё зависит от амплитуды переменных полей.

Не забывайте, что есть ещё и биоэффективные частоты человеческого тела — мы уже говорили о них в первой части книги. В диапазон частот от нуля до 100 Гц попадают частоты отклика кровеносной, сердечно-сосудистой и периферической нервной систем, а также основные ритмы мозга. Резонансные частоты нервных волокон 50–60 Гц близки к технической частоте. Любой сбой ритма этих важнейших систем может отозваться во всём организме. Особенно опасны частоты около 10 Гц (частота сердца) и 8–12 Гц (диапазон альфа-волн).

В конце 1970-х годов в ряде стран были начаты масштабные эпидемиологические исследования по влиянию полей технической частоты на здоровье населения. В Швеции наблюдали за здоровьем 500 тысяч людей, проживающих вдоль трасс линий электропередач (ЛЭП) в условиях повышенных уровней магнитного поля технической частоты. Оказалось: если индукция магнитного поля превышала 0,3 мкТл, то раковые заболевания и лейкозы у детей встречались в два раза чаще. Аналогичные результаты были получены в Финляндии, Дании, США и Канаде. (Справедливости ради отметим, что не все исследовательские группы подтвердили такие результаты. Споры о повышенном риске рака в связи с воздействием магнитных полей ЛЭП не утихают до сих пор.) Сейчас во многих странах принято считать безопасным уровнем низкочастотного магнитного поля в местах длительного пребывания людей величину 0,2 мкТл (так называемый «шведский стандарт»). Запомните это число! Такое поле может быть зарегистрировано на расстоянии 500 метров от ЛЭП. Эта величина (0,2 мкТл) сопоставима с амплитудой нерегулярных изменений геомагнитного поля при очень сильных магнитных бурях.

**Сейчас во всём мире техногенные магнитные поля считаются гораздо опаснее для здоровья, чем электрические. Однако большинство линий электропередач строилось без учёта «магнитной опасности»: охранные зоны вокруг них**

**определяли только по уровню электрического поля. В итоге старые жилые здания могут располагаться вблизи ЛЭП, так что уровень магнитного поля в некоторых зданиях достигает 3,5 мкТл. Трансформаторные подстанции тоже могут приводить к превышению допустимого уровня полей.**

В 2007 году в России были введены ПДУ полей технической частоты 50 Гц для населения (до этого нормировались только поля на рабочих местах): в жилых помещениях, детских, общеобразовательных и медицинских учреждениях магнитное поле не должно превышать 5 мкТл. Как видите, это в 25 раз больше «шведского стандарта». Но у нас в стране только в соответствии с этой нормой вы можете «качать права».

Нормативы Международной ассоциации радиационной защиты носят рекомендательный характер: для частот 10–400 Гц магнитные поля в местах регулярного пребывания людей не должны превышать 0,1 мкТл.

**В 2002 году Международное агентство по исследованию рака включило магнитные поля частоты 50–60 Гц в список «возможных канцерогенных факторов».**

## **ПОЛЯ БЫТОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ**

Около проводника, по которому протекает ток, возникают одновременно электрическое и магнитное поля. Источниками переменных магнитных полей в наших квартирах являются все приборы, потребляющие большой ток (а значит, и большую мощность): грили, утюги, вытяжки, холодильники, телевизоры, компьютеры и блоки питания, общий силовой кабель подъезда или лифта.

Наибольший вклад в электромагнитное загрязнение внутри домов дают кабельные линии, подводящие электричество ко всем квартирам и внутри них, а также распределительные щиты и трансформаторы. В помещениях, смежных с этими источниками, уровень магнитного поля обычно повышен. Постарайтесь не ставить кровать или рабочий стол в опасную зону, то есть ближе чем три-пять метров к распределительным щитам.

Что касается электроприборов, то самые мощные, а значит, и самые опасные из них — это электрическая плита и микроволновка (СВЧ-печь). Магнитное поле СВЧ-печи на расстоянии 1 м редко бывает ниже 0,5 мкТл (мы сейчас говорим о поле, созданном током электропитания печи, а не о её СВЧ-излучении — это будет предметом особого разговора). Электрическая плита на расстоянии 30 см создаёт магнитное поле до 4 мкТл. Правда, мы не проводим возле плиты или СВЧ-печи много времени, что сильно смягчает ситуацию. Высокие уровни магнитного поля регистрируют также возле посудомоечных машин, пылесосов и холодильников с системой «без инея». Блоки питания компьютеров, зарядные устройства смартфонов создают значительное поле на расстояниях до 1 м.

Понятно, что шарахаться от всех бытовых приборов не надо, просто держитесь от работающих устройств подальше и не размещайте наиболее мощные электроприборы вблизи мест продолжительного пребывания или сна. «Зона риска», в которой магнитное поле может превышать «шведский стандарт» 0,2 мкТл, для большинства мощных бытовых устройств находится в диапазоне от 1 до 1,5 метров.

Мы обычно не принимаем во внимание поля энергосберегающих ламп. А между тем их пускорегулирующие аппараты создают существенное магнитное поле как промышленной частоты, так и радиочастотного диапазона. Это касается как КЛЛ, так и светодиодов с некачественными драйверами. Эти лампы совершенно безопасны на потолке, но размещать их ближе чем 30–40 см от головы не стоит.

**При заземлении бытовой техники создаваемые электромагнитные поля уменьшаются в несколько раз. Увы, дома советской постройки оснащены двухпроводной сетью без заземления. Только после 1985 года стали строить дома с трёхпроводной сетью, предполагающей заземление.**

## **МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ТРАНСПОРТА НА ЭЛЕКТРОТЯГЕ**

Магнитные поля имеются не только внутри вагонов трамваев, троллейбусов, метро, поездов, но и на прилегающих территориях, ведь контактные сети создают земные токи растекания, и эти токи суще-

ственно изменяют фоновые уровни магнитных полей на десятки метров вокруг. При разгоне и торможении транспорта поля меняются скачкообразно, «всплесками». В некоторых зонах пиковые значения магнитного поля достигают 100 мкТл. Подобные «скачущие» поля с точки зрения их влияния на живые организмы считаются достаточно агрессивными. При систематическом воздействии они могут вызывать «срыв адаптации» к другим неблагоприятным факторам, то есть снижать устойчивость организма. Особенно такие поля нежелательны для людей, уже страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями.

Самые большие скачки магнитного поля наблюдаются в метро. На платформе во время торможения и разгона поезда регистрируются поля 50–100 мкТл. Поле на платформе вернётся к исходному состоянию после того, как состав подключится к другому контактному рельсу. А в самом вагоне магнитное поле достигает ещё больших значений: 100–150 мкТл.

Самым безвредным из наземного электрического транспорта с точки зрения наличия магнитных полей в салонах были троллейбусы. (Не правда ли, жаль, что троллейбусы ушли с наших улиц?) Даже при разгоне троллейбуса поле в салоне невелико. Дело в том, что по двум проводам контактной сети текут постоянные токи противоположного направления, и их магнитные поля в окружающем пространстве частично компенсируют друг друга. А в трамвае обратным проводом служат рельсы. Среднее поле в движущемся трамвае 30 мкТл. На уровне пола прямо над двигателем поле сильнее (в пиковые моменты достигая 250 мкТл), а чем выше от пола, тем оно слабее.

В пригородных электричках средние значения магнитного поля составляют 20 мкТл, достигая при разгоне и торможении 75 мкТл. В пассажирских вагонах поездов дальнего следования поля сильнее: на уровне пола они достигают сотен мкТл, в других местах купе — десятков мкТл.

К счастью, в транспорте обычный человек проводит не столь уж много времени.

Какому же усреднённому совокупному воздействию полей подвергается житель большого города? По оценкам петербургских специалистов, в будние дни средняя величина техногенных низкочастотных по-

лей составляет 0,6 мкТл (что соответствует экстремальной магнитной буре), в выходные в полтора раза меньше. Но это не прямые измерения, а оценки. А вот в Германии Федеральное ведомство по радиационной защите попыталось измерить уровень повседневного воздействия магнитных полей при участии двух тысяч добровольцев, которые носили специальные дозиметры 24 часа в сутки. Полученные данные значительно отличались для разных людей, но средний уровень техногенного магнитного поля составил 0,1 мкТл. Интересно, что между фермерами и горожанами не оказалось значительной разницы (с точки зрения воздействия полей). Вдохновляющий результат!

**Согласно оценкам, в городах главным неблагоприятным фактором, воздействующим на здоровье населения, является всё же акустический шум, а электромагнитные поля стоят на втором месте.**

## **ГЛАВА 4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Люди изменили электромагнитный фон не только в местах своего обитания. Буквально вся наша планета окутана ради шумом техногенного происхождения. Суммарная мощность радиоизлучения, создаваемого человечеством, сопоставима с радиоизлучением Солнца! Какие-то излучения простой горожанин не имеет возможности контролировать (среди них теле- и радиовещание), а какие-то — может.

Попробуем разобраться, что за опасности со стороны электромагнитных излучений нам грозят и как их минимизировать.

### **РАДИОВОЛНЫ. МИКРОВОЛНЫ**

Как уже говорилось, излучение электромагнитных волн радиотехническими устройствами становится существенным при достаточно высоких частотах изменения полей: выше 30 тысяч герц (30 кГц). С этой частоты начинается отсчёт частотных диапазонов радиовещания. Со стороны высоких частот радиодиапазон граничит с инфракрасным диапазоном (частота около 300 миллиардов герц, то есть

300 ГГц). Всеми диапазонам радиочастот соответствуют длины волн в вакууме от 10 км до 0,1 мм.

**Конечно, радиоволны могут иметь длины волн и больше 10 км, но излучение сверхдлинных волн — технически очень сложная задача, так как с ростом длины волн увеличиваются размеры излучающих антенн. Сверхдлинные волны использовались для связи с подводными лодками, так как более короткие волны сильно поглощаются морской водой. Но из-за крайне высокой технической сложности передатчики сверхдлинных волн были только в СССР и США.**

Влияние переменных полей на человека усиливается с ростом частоты, поэтому среди радиоволн особо выделяют диапазон микроволн, или сверхвысокочастотный (СВЧ) диапазон. Ему соответствуют частоты выше 300 миллионов герц (300 МГц) и длины волн менее 1 м. Источники микроволн — это спутниковое телевидение, мобильные телефоны, радионяни, беспроводные наушники, спутниковая навигация, микроволновые печи, беспроводные компьютерные сети. В общем, самые необходимые в современной жизни устройства.

При высоких интенсивностях радиоизлучения могут представлять опасность для здоровья, а при малых интенсивностях быть даже полезными. Так, в медицине применяют УВЧ-терапию: воздействие на очаг воспаления слабым электромагнитным излучением дециметрового диапазона (это самый «мягкий» вариант микроволн, называемый ультравысокими частотами). Наиболее вредным для организма человека является более высокочастотное СВЧ-излучение сантиметрового диапазона (частоты от 3 до 30 ГГц).

Отметим ещё, что глубина проникновения микроволн в ткани организма с ростом частоты становится всё меньше и меньше (так называемый скин-эффект), что связано с более сильным поглощением энергии волны в организме на каждом отрезке пути. Если частота излучения возросла в четыре раза, глубина проникновения уменьшилась в два раза; если частота возросла в 100 раз, глубина проникновения уменьшилась в 10 раз. Волны метрового диапазона (частота меньше 300 МГц) пронизывают всё тело. При частотах в районе 1–3 ГГц глу-

бина проникновения излучений в биологические ткани составляет несколько сантиметров (именно поэтому пицца в микроволновке, работающей на частоте 2,45 ГГц, греется в слое толщиной несколько см, оставаясь холодной внутри). При частотах выше примерно 10 ГГц практически всё излучение поглощается в поверхностном слое тела.

## **МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ И НОРМИРОВАНИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ**

Переменное электрическое поле волны возбуждает индукционные токи в проводящих тканях организма (кровь, лимфа, слизистые, хрусталик...). При достаточно низких частотах (менее 1 МГц) на мышцы и нервы воздействуют сами эти токи. А при более высоких частотах механизмом воздействия становится нагревание тканей индукционными токами — подобно тому, как индукционная плита нагревает еду в кастрюле. Организм спасается от перегрева путём дополнительного притока крови к нагретым тканям. Но некоторые органы не содержат кровеносных сосудов или их очень мало, и этот механизм терморегуляции не срабатывает. Так, хрусталик лишён кровеносных сосудов, и СВЧ-облучение может привести к его помутнению и разрушению. По той же причине уязвимы для микроволн мозг, желчный пузырь, мочевого пузырь и желудочно-кишечный тракт: отток теплоты от этих органов с помощью кровотока затруднён.

Тепловой механизм воздействия СВЧ-излучений сомнений не вызывает. Но многие учёные убеждены, что существует ещё специфическое нетепловое воздействие (иногда его называют информационным). Механизм его ещё мало изучен. Но исследования, проведённые в Советском Союзе ещё в 1980-х годах, показали, что даже при отсутствии заметного теплового воздействия радиоволны могут вызывать нервные расстройства (повышенную утомляемость, бессонницу, депрессивные состояния), а также нарушения функций сердечно-сосудистой системы и обмена веществ. Есть подозрения, что СВЧ-излучения подавляют выработку Т-киллеров, главной функцией которых является уничтожение повреждённых клеток собственного организма, а такое подавление является прямым путём к раку. СВЧ-излучения ослабляют также клеточные мембраны (резонансные частоты клеточных мембран как раз порядка нескольких ГГц), облегчая ви-

русам и прочим микроорганизмам проникновение в клетки (такой способ ослабления клеточных мембран применяют в генной инженерии).

Более 40 лет ведутся споры о нетепловом действии радиоизлучений на организм. В зависимости от того, признаётся или не признаётся в научном сообществе страны это действие, устанавливаются те или иные предельно допустимые уровни (ПДУ) излучений. Теперь вы не будете удивляться, почему эти уровни так сильно отличаются в разных странах.

Отметим, что для радиоволн с частотами менее 300 МГц (с длинами волн более 1 метра) нормируются амплитуды электрического и магнитного полей, причём с ростом частоты допустимые величины полей становятся всё меньше (мы не будем здесь приводить конкретные цифры). А для микроволн (то есть частот более 300 МГц) ограничивается плотность потока энергии, то есть энергии, переносимой волной через поперечную площадку площадью 1 кв. см за 1 секунду (эту величину называют также плотностью излучения), единицей её измерения является Вт/см<sup>2</sup>.

В США предельно допустимая плотность излучения микроволн принята равной 1000 мкВт/см<sup>2</sup>=10 Вт/м<sup>2</sup>. Эта величина соответствует тепловому порогу, то есть заметному нагреванию тканей (в США не признают нетеплового действия полей).

В России и ряде стран Европы предельно допустимая плотность излучения в сто раз меньше: 10 мкВт/см<sup>2</sup> = 0,1 Вт/м<sup>2</sup>. Это норма для населения; для рабочих мест нормы обычно в 5 раз выше. В некоторых странах (Бельгии, Испании, Италии, Бразилии, Канаде, Великобритании и других) ПДУ ещё меньше. При тестировании устройств – источников микроволн (за исключением мобильных телефонов) требуют соответствия ПДУ плотности излучения, принятому в данной стране.

**Самые осторожные нормы для плотности излучения микроволн были в своё время в СССР: 1 мкВт/см<sup>2</sup>. Именно эта величина (для населения) соответствует современной рекомендации Международной ассоциации радиационной защиты.**

## РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТАХ

Основные источники радифона в местах обитания людей — это передающие радио- и телевизионные станции, а также базовые станции сотовой связи. Излучение, связанное с радио- и телевизионным вещанием, в среднем сильнее, чем излучение антенн базовых станций.

Средний фоновый уровень плотности радиоизлучений в больших городах очень невелик по сравнению с ПДУ: он составляет всего 0,05 мкВт/см<sup>2</sup>. Но этот фон распределён очень неравномерно. Вблизи передающих устройств или радарных систем могут наблюдаться повышенные плотности излучения. По оценкам, около 1% жителей крупных городов подвергаются избыточному облучению. В Москве главные передающие источники — это Останкинская телебашня, Шуховская башня на Шаболовке и Московская радиовещательная станция на улице Демьяна Бедного (Северо-Западный округ). В советское время именно на Московской радиовещательной станции работали мощные «глушилки вражеских голосов», что создавало значительный добавочный радиошум. В конце 1980-х все они были отключены.

Обязанность контролировать соблюдение санитарно-гигиенических норм в районах жилой застройки столицы возложена на московский Центр Госсанэпиднадзора. По данным этого центра, в районах Москвы, прилегающих к передающим радио- и телевизионным станциям, не наблюдается повышенной заболеваемости лейкозами среди детей, которая могла бы стать индикатором неблагоприятной электромагнитной обстановки.

Сейчас во всех городах продолжается бурное развитие сотовой мобильной связи. Мы уже на пороге внедрения пятого поколения мобильных сетей 5G (G — это сокращение от Generation: поколение). Для увеличения скорости передачи информации поднимают частоту излучений. Предыдущие поколения сотовой связи работали в частотных диапазонах от 450 МГц до 2,6 ГГц. Сети же 5G будут охватывать диапазон от 6 до 100 ГГц. Между прочим, вблизи частоты 40 ГГц наблюдается резонанс третичной структуры ДНК, так что вблизи этой частоты следует быть особо осторожным.

Запуск сетей нового поколения начался, новая технология уже работает в пилотном режиме в 24 странах мира. Базовых станций будет

больше из-за уменьшения радиуса их действия (микроволны более высоких частот сильнее поглощаются в окружающей среде), зато и мощность их излучения будет гораздо меньше из-за уменьшения площади покрываемой зоны. Существующие нормы плотности излучения (у нас  $10 \text{ мкВт/см}^2$ ) не будут нарушены.

**В марте 2021 года компания МТС запустила первую в России сеть 5G в 14 тестовых зонах Москвы, среди которых Лубянская площадь, инновационный центр Сколково, главная аллея и каток ВДНХ, развлекательный центр «Остров мечты» и другие. Сеть работает в полосе частот от 4,4 до 5 ГГц. В ближайшее время будет использован диапазон 24,25–24,65 ГГц.**

Сторонники исключительно теплового механизма воздействия микроволн убеждают, что никакого вредного воздействия не было и не будет. Сторонники нетеплового механизма воздействия опасаются возрастания рисков для населения. Единства мнений здесь не было и нет.

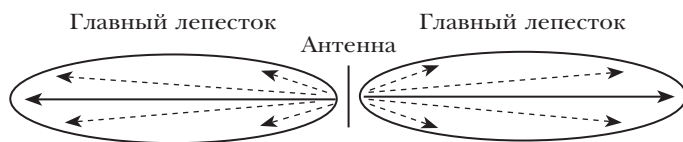
**Жертвами поколения 5G могут стать пчёлы и другие насекомые. Излучения с частотами от 12 до 24 ГГц сильнее всего поглощаются телом пчелы и оказывают на него тепловое воздействие. Массовая гибель пчёл, которая уже идёт с начала 2000-х, вызвана различными причинами (пестициды, климатические изменения и другие), среди которых важную роль играют техногенные электромагнитные поля. К такому выводу пришли американские учёные.**

## **ИЗЛУЧЕНИЕ АНТЕНН БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ**

На одной и той же башне базовой станции имеются как передающие, так и приёмные антенны. Приёмные антенны, по определению, не излучают, а только принимают. Передающие антенны находятся на самом вершине башни. Под ними расположены радиоблоки, преобразующие цифровой сигнал в аналоговый. В самом низу — «мозг» базовой станции (оборудование, обрабатывающее цифровой сигнал, и эле-

менты питания); источником шума являются вентиляторы систем охлаждения, размещённые тут же.

Передающая антенна не «светит» равномерно во все стороны. В направлении собственной оси (по вертикали) она вообще не излучает. Максимально антенна излучает в направлении, перпендикулярном своей оси, то есть в горизонтальной плоскости, причём основная энергия излучения (более 90%) сосредоточена в довольно узком секторе – его называют главным лепестком. По своей конструкции антенны бывают разные. Всенаправленные антенны излучают равномерно по всем направлениям, перпендикулярным оси антенны. На рисунке 20 схематически изображена диаграмма, которая даёт представление о сравнительной интенсивности излучения по разным направлениям от антенны. Мысленно вращайте эту картинку вокруг оси, совпадающей с антенной, – примерно такую форму в пространстве будет иметь опасная зона, в которой плотность излучения превышает ПДУ. Протяженность опасной зоны по горизонтали зависит от мощности антенны и для антенн базовых станций обычно составляет не более 40 метров. Эта величина зависит не только от мощности излучателя, но и от принятого ПДУ для плотности излучения. К примеру, в Украине принят ПДУ  $2,5 \text{ мкВт/см}^2$  (в четыре раза ниже, чем в России), поэтому расстояния от базовых станций до линии застройки должны быть примерно в два раза больше. Но гораздо чаще на базовых станциях применяют направленные антенны, основное излучение которых сосредоточено в одном горизонтальном секторе шириной 30, 60 или 120 градусов. Антенну устанавливают так, чтобы главный лепесток её излучения был направлен в сторону от прилегающих построек. Это необходимо не только для охраны нашего здоровья, но и для нормального качества передаваемого сигнала.



*Рис. 20. Упрощённый вид диаграммы направленности излучения всенаправленной антенны. Возможно также наличие более слабых дополнительных боковых лепестков*

Поскольку антенны базовых станций располагают обычно на высотах 17–30 м от уровня земли, самыми безопасными с точки зрения облучения являются нижние этажи зданий. Если станция размещена на крыше дома, то квартиры прямо под ней находятся в мёртвой зоне воздействия. Проявлять беспокойство могут жильцы, чьи квартиры находятся примерно на уровне передающей антенны на небольшом расстоянии от неё. Но наверняка главный лепесток излучения этой антенны направлен в сторону от дома. Если вы всё же подозреваете, что подвергаетесь повышенному уровню облучения от антенн ближайшей базовой станции, можете вызвать специалиста по замеру облучения на сайте Роспотребнадзора или воспользоваться телефоном горячей линии по безопасности сотовой связи. В случае выявления превышения ПДУ решать проблему будет тот, кто построился позже: оператор базовой станции или застройщик дома.

**Оконное стекло уменьшает плотность микроволнового излучения в два-три раза, бетонные стены — примерно в 30 раз. На балконе напротив вышки вы подвержены более сильному облучению, чем в квартире.**

## **ИЗЛУЧЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕФОНОВ И СМАРТФОНОВ**

Даже если все нормы по уровню внешнего излучения соблюдены, мы имеем шанс подвергать себя избыточному облучению от собственных гаджетов. Как уже упоминалось, ПДУ плотности излучения  $10 \text{ мкВт/см}^2$  не относится к аппаратам мобильной связи: для них допустимая плотность излучения в 10 раз больше, то есть  $100 \text{ мкВт/см}^2$ . Так сильно аппарат излучает не всегда, а в тех случаях, когда приём слабый или сеть не ловится, а также когда он переключается от одной вышки на другую. Тогда ваш аппарат выходит на максимальную мощность своего передатчика и постоянно посылает запрос. Так что в наших интересах, чтобы базовые станции стояли достаточно часто, а максимальная мощность излучения гаджетов была как можно меньше. Мощность современных гаджетов варьируется от  $0,125 \text{ Вт}$  до  $2 \text{ Вт}$ . Мобильные телефоны первого поколения имели мощность излучения

до 5 Вт (ведь базовых станций было ещё мало), и потенциальный риск для здоровья от их применения был гораздо выше.

**Очень важно не прижимать аппарат к уху во время разговора. Вблизи передающей антенны телефона каждый лишний сантиметр имеет значение, потому что интенсивность излучения в ближней зоне очень быстро убывает с ростом расстояния от антенны. Желательно держать аппарат не ближе 10–20 см от тела.**

В Европе и США для характеристики аппаратов мобильной связи и других источников микроволн используют параметр SAR (Specific Absorption Rate) – удельный коэффициент поглощения. Он характеризует поглощение мощности излучения единицей массы тела, единицей его измерения является Вт/кг. От величины SAR зависит, на сколько градусов нагреются ткани головы при разговоре или ткани тела при ношении аппарата. Так, если SAR равен 2 Вт/кг, температура тканей при использовании аппарата возрастёт на 0,3 градуса (такой допустимый уровень SAR принят в Европе для гаджетов). Опасным считается повышение температуры тканей тела более чем на 1 градус. SAR измеряется отдельно для головы и для тела, поскольку они по-разному поглощают излучение. При измерениях SAR используют специальные манекены, а не живых людей. Разработчики следят, чтобы SAR не превышал установленного допустимого уровня в режиме максимальной мощности, иначе аппарат не будет сертифицирован. Типовые значения SAR лежат в диапазоне 0,8–1,5 Вт/кг. Чем выше SAR, тем лучше качество связи. И всё же, очевидно, чем этот параметр меньше, тем безопаснее для здоровья.

Научно обоснованных данных по длительному, в течение десятилетий, воздействию излучению сотовых телефонов на мозг пользователя ещё не накоплено. В данных условиях, согласно рекомендации ВОЗ, разумно придерживаться предупредительного принципа: лучше переоценить опасность, чем недооценить.

Над внешним фоном радиоизлучений мы не властны, но в наших возможностях избегать избыточных уровней облучения, правильно выстраивая свои отношения с личными гаджетами. Правила просты

и всем известны: использование проводной гарнитуры или громкой связи, небольшая продолжительность разговоров. Желательно избегать звонков при низком уровне сигнала, требующем максимальной мощности излучения. В частности, нежелательны звонки из автомобиля, автобуса, тоннелей, подвальных помещений.

**В 2011 году Международное агентство исследования рака (IARC), входящее в структуру ВОЗ, на основе результатов серии исследований классифицировало электромагнитные поля радиочастот как возможное канцерогенное излучение для людей.**

## **МОБИЛЬНЫЕ ТЕЛЕФОНЫ И ДЕТИ**

Дети особо беззащитны перед электромагнитными излучениями, в том числе от мобильных телефонов. Черепная коробка ребёнка тоньше, глубина проникновения излучений в мозговые ткани больше, а объём мозга меньше. Если у взрослого зона облучения захватывает около 15% мозговых структур, то у пятилетнего ребёнка зона охвата целых 80%! Кроме того, именно растущие организмы особо чувствительны к воздействию экологических угроз. У разных органов и систем имеются свои «окна восприимчивости», когда они особенно уязвимы.

По мнению Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений, сформулированному ещё в 2008 году, у детей, активно использующих мобильные телефоны, можно ожидать ближайшие расстройства в виде ослабления памяти, снижения внимания и умственных способностей, раздражительности, нарушения сна. А в более старшем возрасте (25–30 лет), по мере накопления побочных эффектов в клетках, повышается вероятность опухолей головного мозга. В возрасте 50–60 лет возрастает риск болезни Альцгеймера и других проявлений дегенерации нервных структур головного мозга. Возможно, российские учёные перестраховываются, сгущают краски? Но исследования, которые проводятся с 1997 года в ряде других стран, тоже указывают на увеличение риска развития глиомы мозга при дли-

тельном пользовании мобильными телефонами, особенно для людей, которые начали пользоваться мобильниками с 8–10-летнего возраста.

Есть крупномасштабные эксперименты, убедительно доказывающие негативное влияние микроволн на грызунов и куриные эмбрионы. Но очень сложно отследить долгосрочные результаты воздействия излучений на здоровье людей, потому что неясно, как отделить их от влияния прочих негативных факторов. Строго научно обоснованных доказательств долгосрочного вреда от излучения мобильных телефонов и прочих гаджетов нет. Также нет доказательств их безопасности. Юные пользователи первых мобильных телефонов только входят в зрелый возраст. Исследования продолжаются.

Так, в 2019 году на Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений» учёные из Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Института космических исследований и Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений представили результаты единственного в мире 14-летнего исследования воздействия электромагнитного излучения мобильных телефонов на психофизические показатели детей и подростков. Мониторинг таких показателей проводился в двух группах школьников: использующих мобильные телефоны (1161 человек) и не использующих (370 человек). Установлены статистически значимые ухудшения показателей сенсомоторных реакций, утомления, работоспособности, когнитивных функций пользователей по сравнению с контрольной группой. Показано, что безопасные режимы пользования гаджетов (наушники, громкая связь, использование SMS, MMS) улучшают все психофизические показатели.

**В России с 2003 года в санитарных правилах и нормах рекомендовалось ограничение возможности использования мобильных телефонов лицами, не достигшими 18 лет, из-за того, что стандарты безопасности для мобильных телефонов были разработаны для взрослых и не учитывали особенности детского организма. Но, в обход этой рекомендации, смартфоны уже прочно вошли в обиход школьников. С 1 января 2021 года действует новый свод санитарных**

**правил, в котором сказано: «Для образовательных целей мобильные средства связи не используются».**

## **WI-FI РОУТЕРЫ**

По интенсивности воздействия на людей с личными гаджетами конкурируют прежде всего Wi-Fi роутеры – устройства, которые подключаются к Интернету через кабель, а потом «раздают» Интернет всем устройствам домашней сети с помощью радиосигналов, беспроводным способом. Плотность излучения Wi-Fi сети меньше, чем для мобильного телефона, но это, во-первых, облучение всего тела, а во-вторых, это облучение не кратковременное, а длящееся часами.

Wi-Fi роутеры могут использовать две полосы частот: 2,4 ГГц и 5 ГГц. Что существенно, все устройства беспроводной связи, включая Wi-Fi, обмениваются данными с помощью импульсного излучения. Между тем импульсные электромагнитные поля более агрессивно влияют на живые организмы, чем непрерывные излучения.

В инструкции к Wi-Fi роутеру указывается безопасное расстояние, на котором плотность излучения не будет превышать ПДУ (обычно это два-три метра). Проблема в том, что в многоквартирном доме накладываются друг на друга сигналы сразу от нескольких Wi-Fi сетей (их может быть более десятка), ведь радиус действия Wi-Fi роутеров в помещении около 50 метров (он зависит от мощности роутеров). Возможно, вы отключаете свой Wi-Fi роутер на ночь или при длительном перерыве в использовании, но ваши соседи могут этого не делать.

Несмотря на все заверения производителей о полной безвредности этих излучений, накапливается всё больше данных о результатах нетеплового воздействия микроволн на две наиболее важные регуляторные системы организма: нервную и эндокринную. Чем выше частота, тем сильнее повреждающее действие. И что не вызывает сомнений – это то, что влияние излучений на детей сильнее, чем на взрослых. Кроме того, эффекты воздействия носят накопительный характер и могут проявиться спустя годы.

Эксперименты на мышах показали: воздействие микроволн, не превышающих «человеческий» ПДУ, в течение одного-двух месяцев вызвало очень малые изменения в структуре головного мозга и нейронов,

причём эти изменения исчезали после прекращения воздействия. Однако при более длительном облучении изменения становились необратимыми. А через несколько поколений эти мыши стали стерильны.

Конечно, нельзя результаты опытов на мелких грызунах переносить на людей, потому что мы имеем совсем другое отношение площади поверхности к объёму (излучение поглощается в поверхностном слое тела). Но поневоле задумаешься: возможно, мы сильно недооцениваем ущерб, который Wi-Fi может нанести в долгосрочной перспективе, даже через несколько поколений.

А пока следует стараться умеренно оградить себя от Wi-Fi и по возможности использовать проводные технологии.

**Группа учёных в Нидерландах исследовала влияние Wi-Fi на деревья. Через три месяца облучения деревья сбрасывали часть листвы, страдали от аномального отмирания коры и замедления роста. Схожие симптомы проявляются у большинства деревьев в голландских городах, где хорошее покрытие Wi-Fi.**

## **ДЕТИ И БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

24 февраля 2017 года в Рейкьявике прошла международная конференция «Дети, время, проводимое перед экранами, и излучение от беспроводных устройств», в которой участвовали эксперты по электромагнитному излучению, онкологи, педагоги и другие специалисты. По итогам конференции более ста участников подписали открытое обращение к властям и администрациям школ во всём мире. Основные положения этого документа можно свести к следующему (полный текст вы можете найти в Интернете).

Облучение от базовых станций мобильных телефонов, точек доступа Wi-Fi, смартфонов, ноутбуков и планшетов постоянно происходит в школе и дома. Многочисленные научные исследования показали значительный медицинский риск при длительном воздействии электромагнитного излучения в радиочастотном диапазоне от беспроводных устройств и сетей на уровне даже значительно ниже рекомендуемого по нормативам Международной комиссии по защите от неионизирующей

щего излучения. Такие излучения связаны с повышенным риском раковых заболеваний, особенно опухолей головного мозга. Развивающиеся и незрелые клетки детских организмов более чувствительны к воздействию электромагнитных излучений. К тому же риск для детей может быть усилен эффектом накопления в течение жизни.

Помимо риска развития рака радиочастотное излучение, возможно, также воздействует на гематоэнцефалический барьер, открывая путь в мозг токсичным молекулам, повреждает нейроны в гиппокампе (центре памяти мозга), влияет на экспрессию белков в головном мозге, участвующих в обмене веществ, реакцию на стресс и нейропротекцию, а также влияет на уровень нейромедиаторов. Исследования выявили когнитивные нарушения, затрагивающие обучение и память.

Авторы обращения подчёркивают, что поддержка проводных технологий в образовании является более безопасным решением, чем использование Wi-Fi сетей, и просят власти и администрации школ во всём мире придерживаться принципа «минимизации вреда» (принципа ALARA – As Low AS Reasonably Achievable) и принять все разумные меры, чтобы снизить воздействие радиочастотного излучения.

«Мы призываем власти взять на себя ответственность за здоровье и благополучие наших детей в будущем», – говорится в обращении. – «Откажитесь от беспроводных сетей в дошкольных учреждениях, детских садах и школах».

**Результаты исследований международной программы по оценке образовательных достижений учащихся PISA по чтению и математике показывают снижение результатов в странах, которые вложили наибольшие средства в компьютеризацию школ.**

## **ДРУГИЕ БЫТОВЫЕ ИСТОЧНИКИ МИКРОВОЛН**

Мобильная связь и Wi-Fi – это основные потенциально опасные источники микроволновых излучений для людей (мы не говорим сейчас о тех профессионалах, которые работают с этими излучениями и хорошо осведомлены о рисках и способах защиты). Но мы использу-

ем в быту и другие источники радиоволн, среди которых особо популярны беспроводные наушники и микроволновые печи.

Наушники Bluetooth используют микроволны с частотами 2,4–2,48 ГГц. В том же самом частотном диапазоне работают микроволновые печи, Wi-Fi роутеры, а полоса частот вблизи 2,6 ГГц используется для мобильной связи. Сигналы от наушников Bluetooth гораздо менее интенсивны, чем сигналы сотовой связи, но антенна наушников расположена внизу под ухом, то есть в непосредственной близости к головному мозгу. Беспроводные наушники используют десятки миллионов людей во всём мире. С одной стороны, нет никаких научных доказательств, что в перспективе эти наушники могут угрожать здоровью пользователей. С другой стороны, обратное тоже не доказано, ведь это относительно молодой тип гаджетов, и полноценных клинических исследований по изучению их влияния на организм не хватает. Выбор за вами.

Микроволновые печи начали входить в нашу жизнь с 1980-х. Микроволны, генерируемые магнетроном на частоте 2,45 ГГц, могут быстро нагревать вещества, в состав которых входят полярные молекулы, то есть такие молекулы, на одном конце которых находится положительный заряд, а на втором отрицательный. Полярными являются прежде всего молекулы воды, а также глюкозы и жиров. В электрическом поле волны полярные молекулы поворачиваются туда-сюда с частотой 2,45 ГГц, стремясь расположиться вдоль поля. Энергию для своих поворотов они поглощают у микроволн, а расталкивая соседние молекулы, передают им часть поглощенной энергии, что и приводит к нагреванию. Микроволны, отдавая свою энергию, затухают, проникнув в вещество на глубину нескольких сантиметров. Разогрев более глубоких слоёв происходит уже за счёт теплопроводности, то есть гораздо медленнее.

Производители микроволновых печей гарантируют, что на расстоянии 50 см от дверцы плотность СВЧ-излучения не будет превышать ПДУ ( $10 \text{ мкВт/см}^2$ ), и не рекомендуют находиться ближе этого расстояния во время работы печи. Однако со временем степень защиты от излучений, которую обеспечивает многослойная дверца печи, может снижаться, в основном из-за появления микрощелей в уплотните-

ле дверцы. В процессе эксплуатации материалы дверцы изнашиваются, могут появиться механические повреждения. Тогда плотность потока излучения сильно возрастает. Через несколько лет печь желательно заменить на новую.

А главное — каждый источник микроволн сам по себе удовлетворяет санитарно-гигиеническим нормам, но они же все действуют на нас одновременно: и излучение базовых станций сотовой связи, и Wi-Fi, и беспроводные наушники, и радионяни, и микроволновые печи (не говоря о телевидении и радиовещании)... Кто знает, что вы получите в итоге? Для человека важно суммарное излучение, которому подвергается организм.

Вы уже поняли, что в настоящее время гарантий безопасности для здоровья в долгосрочной перспективе никто не даст. Единства мнений по этому вопросу среди учёных нет. Мы сами решаем за себя и за своих детей, на какие риски готовы пойти ради комфорта и использования всех благ научно-технического прогресса.

# ЧАСТЬ 4. НАДО ЛИ БОЯТЬСЯ РАДИАЦИИ?

*Как и в предыдущих частях книги, сначала уделим внимание физике: поговорим о природе радиации и о дозиметрических величинах, характеризующих воздействие радиации на людей. Потом обсудим естественные источники радиации и дозы, которые они нам в среднем обеспечивают. В конце рассмотрим техногенные источники радиации и выделим приоритетные среди них. И ответы на вопросы, надо ли бояться радиации и какие меры предосторожности стоит принимать, постепенно сами собой прояснятся.*

# ГЛАВА 1. ВИДЫ РАДИАЦИИ

## ЧТО ТАКОЕ РАДИАЦИЯ?

Разберёмся для начала, что понимают под этим термином у нас и за рубежом. Вообще слово «радиация» означает просто «излучение». Так сложилось, что за рубежом сюда относят все электромагнитные излучения, а также радиоактивные излучения и космические лучи.

У нас же в стране принято разделять все излучения на неионизирующие и ионизирующие. Электромагнитные излучения радиодиапазона, а также примыкающего к ним инфракрасного оптического диапазона, относятся к первой категории: энергии квантов этих излучений недостаточно, чтобы оторвать электрон от атома или молекулы, то есть ионизировать. Неионизирующие излучения и их потенциальный вред для здоровья людей мы обсудили в предыдущей части книги.

По мере роста частоты электромагнитных излучений энергии их квантов увеличиваются. Видимый свет обладает ещё очень малой способностью к ионизации, а вот ультрафиолет уже относится к ионизирующим излучениям, причём по мере уменьшения длины волны его ионизирующее действие возрастает. Благодаря этому жёсткое ультрафиолетовое излучение способно изменять химическую структуру тканей и клеток. На этом основано его бактерицидное действие.

Ещё более короткие волны и ещё более энергичные кванты соответствуют рентгеновскому диапазону электромагнитных волн. Условная граница рентгеновского и ультрафиолетового диапазонов лежит в районе 10 нм. Рентгеновское излучение мы получаем с помощью так называемых рентгеновских трубок. Коротковолновая граница рентгеновского диапазона – примерно 0,01 нм.

Но есть ещё более короткие электромагнитные волны, их называют гамма-излучением. Гамма-кванты испускают ядра некоторых атомов при радиоактивном распаде. Энергии таких квантов в сотни тысяч раз больше энергии квантов видимого света, а длины волн меньше 0,01 нм. Гамма-излучение присутствует и в космических лучах.

В нашей стране под термином «радиация» обычно понимают совокупность рентгеновского излучения, всех видов радиоактивных излу-

чений, а также сюда относят космические лучи. Все эти излучения обладают ионизирующим действием, и для количественной характеристики их воздействия на человека используют одни и те же физические величины. Далее мы поговорим подробнее обо всех этих составляющих радиации.



**Радиация — это ионизирующие излучения различного происхождения: рентгеновское излучение, все виды радиоактивных излучений и космические лучи.**

## **ОТКРЫТИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ**

Во второй половине XIX века физики много работали с так называемыми катодными трубками. Это стеклянные вакуумные трубки различной формы, в которые вставлены два электрода: отрицательно заряженный катод и положительно заряженный анод. При подаче между электродами высокого напряжения стекло начинает светиться. В 1897 году после ряда опытов английский физик Дж. Дж. Томсон установил, что «катодные лучи», вызывающие это свечение, представляют собой поток очень лёгких отрицательно заряженных частиц — электронов. Так был официально открыт электрон, о существовании которого давно уже догадывались.

А немного ранее, в конце 1895 года, немецкий физик Вильгельм Конрад Рентген (хотя правильнее было бы произносить его фамилию как Рёнтген) обнаружил, что аноды таких трубок являются источником некоего проникающего излучения, способного засвечивать фотопластинки сквозь чёрную бумагу или сквозь стенки деревянного ящика. Это излучение порождает электроны, которые с огромными скоростями врезаются в анод и резко тормозятся. Икс-лучи, как назвал это излучение Рентген, легко пронизывают мягкие живые ткани, но частично поглощаются костями. Рентген сделал первый рентгеновский снимок: теневое изображение костей кисти руки (это была рука его жены).

Рентген предположил, что икс-лучи имеют электромагнитную природу, потому что они не отклонялись ни электрическим, ни магнитным полями, как отклонялись бы заряженные частицы. В 1912 году

это предположение было доказано опытами по дифракции рентгеновских лучей и была измерена их длина волны.

**За открытие икс-лучей в 1901 году Рентгену была присуждена первая в истории Нобелевская премия по физике. А лучи вскоре стали называть его именем.**

Патента на своё открытие Рентген оформлять не стал. Уже через полгода после открытия рентгеновские лучи начали использовать военные медики для обнаружения пуль у раненых солдат. А во время Первой мировой войны на службе у медиков были рентгеномобили, оборудованные мобильными аппаратами для рентгенографии (они выпускались по инициативе Марии Кюри, и она же вместе со своей дочерью Ирен готовила кадры для их обслуживания).

Однако особых мер предосторожности при работе с рентгеновскими лучами не принимали. Удивительно, но они использовались даже в бытовых целях! Так, с 1924 и до начала 1960-х в Швейцарии были в ходу рентгеновские примерочные для обуви: просвечивая ногу в башмаке, продавец видел, насколько хорошо подходит клиенту обувь. При этом покупатель получал дозу облучения, которая по современным нормам раз в 40 превышает допустимую годовую (к счастью, ноги не являются самой уязвимой частью тела). А уж какому систематическому облучению подвергался продавец, не считал никто. Жертвами рентгеновского облучения стали сотни физиков, медиков и простых граждан.

## **РАДИОАКТИВНОСТЬ**

Практически сразу после открытия Рентгена состоялось ещё одно знаменательное событие: французский физик Анри Беккерель тоже обнаружил некое проникающее излучение, засвечивающее фотопластинки сквозь чёрную бумагу. На этот раз источником излучения были соли урана. По предложению Марии Кюри явление назвали радиоактивностью.

В исследованиях свойств радиоактивного излучения самое деятельное участие приняли Резерфорд, супруги Кюри, Беккерель и многие другие физики и химики. Оказалось, что радиоактивное излучение неоднородно по своей природе: оно состоит из трёх компонент, кото-

рые назвали  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ . Так,  $\alpha$  – это положительно заряженные частицы, ядра атомов гелия;  $\beta$ -лучи – это энергичные (релятивистские) электроны;  $\gamma$ -лучи – жёсткое электромагнитное излучение, подобное рентгеновскому. Энергии всех частиц и  $\gamma$ -квантов очень велики, так что они способны вырывать из атомов даже очень крепко «привязанные» электроны.

Три составляющих радиоактивных излучений сильно различаются по своей проникающей способности:  $\alpha$ -частицы задерживаются даже тонким листом бумаги, а их пробег в воздухе составляет всего несколько сантиметров;  $\beta$ -лучи могут пройти сквозь алюминиевую пластинку толщиной до 3 мм, а в воздухе они проходят до 4 метров;  $\gamma$ -лучи преодолевают несколько сантиметров свинца, а слой бетона толщиной 10 см ослабляет их поток только наполовину.

**Альфа-частицы можно увидеть и невооруженным глазом, а точнее, увидеть крохотные вспышки, возникающие при попадании каждой альфа-частицы на экран, покрытый люминофором. В 1911 году Резерфорд с помощью таких микровспышек исследовал рассеяние альфа-частиц атомами и открыл атомное ядро.**

На радиоактивность не влияют никакие, даже самые интенсивные, физические и химические воздействия: нагрев или охлаждение, изменение агрегатного состояния, обработка химическими реагентами. В 1902 году физик Резерфорд и химик Содди доказали, что радиоактивные излучения сопровождают процесс превращения одного химического элемента в другой. В некотором смысле это то, что безуспешно пытались осуществить средневековые алхимики (хотя получить золото из ртути таким способом всё же нельзя). В то время физики и химики ещё верили в неделимость и вечность атомов. С этой идеей им было непросто расстаться. Так, Дмитрий Иванович Менделеев до конца жизни (он умер в 1907 году) не смог поверить в возможность превращения одних химических элементов в другие.

О существовании атомного ядра Резерфорд узнал лишь в 1911 году, и только после этого стало понятно, что превращение одного элемента в другой связано с самопроизвольным распадом ядра, приводящим

к изменению его состава. Именно потому, что это внутриядерный процесс, на него невозможно повлиять никакими изменениями внешних условий.

## **ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА**

Любой атом в принципе может распасться, но для некоторых эта вероятность столь мала, что за время жизни Вселенной не успевает реализоваться — такие атомы мы называем стабильными. А те, для которых вероятность распада гораздо больше, мы называем радиоактивными.

Радиоактивность — процесс самопроизвольный, вероятностный. Для каждого конкретного ядра вероятность распасться в следующую секунду одна и та же, независимо от того, сколько уже существует это ядро — секунду или миллион лет. Грубо говоря, атомы не стареют, хотя и распадаются иногда. Если в некоторый момент имеется  $N$  радиоактивных атомов данного сорта, то число распадов в секунду будет пропорционально этому числу  $N$ , а коэффициент пропорциональности — это вероятность распада, постоянное число.

Со временем число исходных (материнских) ядер будет убывать по определённому закону. А именно: за равные промежутки времени количество материнских ядер уменьшается в одно и то же число раз. В качестве характеристики процесса обычно берут период полураспада  $T$  — время, за которое число материнских ядер уменьшается вдвое. Прошло время  $T$  — осталась половина исходных ядер, через время  $2T$  осталась половина от половины, то есть четверть ядер, через  $3T$  осталась половина от четверти, то есть  $1/8$  доля ядер... Математически это соответствует экспоненте.

Кстати, точно такому же временному закону подчиняются все процессы, при которых изменение величины за единицу времени пропорционально самой имеющейся величине. Например, число ежегодных смертей на земле пропорционально числу жителей, и если бы не было прироста населения, число жителей уменьшалось бы, как при радиоактивном распаде, с каким-то периодом полураспада. А число родившихся по такому же закону возрастает, но со своим «периодом полувозрастания». Если эти периоды равны, численность населения стабильна. Последние столетия рождаемость доминирует над смертностью, и на земле происходит демографический взрыв.

## СОСТАВ ЯДРА. ИЗОТОПЫ

Ядра атомов состоят из довольно тяжёлых частиц: положительно заряженных протонов и незаряженных нейтронов. Эти две частицы называют одним словом – нуклоны. Они несут в себе практически всю массу атома, лёгкие электроны почти ничего к ней не добавляют. Именно число протонов в ядре отличает один химический элемент от другого. Почему так? Химические свойства атомов зависят от числа электронов на последней, валентной оболочке атома, а это число определяется полным количеством электронов в атоме, ведь они распределяются по оболочкам строго определённым образом. Ну а полное число электронов в атоме равно числу протонов, так как атом в целом не заряжен.

Итак, число протонов равно порядковому номеру элемента в периодической таблице Менделеева: один протон – водород, 2 протона – гелий, 3 протона – литий... 92 протона – уран.

**До 1940 года таблица Менделеева заканчивалась на уране, 92-м элементе. Все элементы, начиная с 84-го, радиоактивны с большими периодами полураспада. Открытые позже трансурановые элементы с номерами 93–104 распадаются довольно быстро, так что за 4,5 миллиарда лет существования Земли они уже исчезли. Их научились синтезировать искусственно. Сейчас в таблице Менделеева представлены 104 элемента, а всего удалось синтезировать элементы до номера 118.**

А вот число нейтронов в ядрах одного и того же химического элемента может немного варьироваться. На химических свойствах элемента это никак не отражается, только на массе. Атомы с одинаковым числом протонов, но отличающиеся по числу нейтронов, называют изотопами. Одни изотопы одного и того же химического элемента могут быть стабильны, а другие радиоактивны. Практически все элементы в природе встречаются в виде смеси изотопов в определённых пропорциях. Например, у водорода три изотопа. У обычного водорода (протия) ядро состоит только из протона, у тяжёлого водорода (дейтерия) ядро содержит протон и нейтрон. В ядре сверхтяжёлого водорода (третия) один протон и два нейтрона, этот изотоп радиоак-

тивен. В природном водороде доля лёгкого водорода составляет 99,985%, дейтерия – 0,015%, трития практически нет. У гелия два стабильных изотопа: гелий-4 (два протона и два нейтрона) и гелий-3 (два протона и один нейтрон). Чемпион по количеству стабильных изотопов – олово: 10 изотопов.

Изотопы невозможно разделить химическими методами – только физическими, по массе. И это очень трудоёмкий процесс, буквально «поштучный».

**Всего на сегодняшний день известно около 270 стабильных и более 2000 радиоактивных изотопов.**

## **РАДИОАКТИВНЫЕ СЕМЕЙСТВА**

При распаде ядер исходного изотопа может возникнуть новый радиоактивный изотоп, который при распаде снова рождает радиоактивный изотоп и так далее. Получается цепочка превращений, в конце которой стоит стабильный изотоп. Все звенья одной цепочки образуют радиоактивное семейство.

Все встречающиеся в природе радиоактивные элементы, начиная с 84-го, принадлежат трём природным семействам. Родоначальником каждого из них является определённый долгоживущий изотоп: торий-232 (всего 232 нуклона, период полураспада 14 млрд лет), уран-238 (238 нуклонов, период полураспада 4,5 млрд лет) и уран-235 (период полураспада 500 млн лет). Период полураспада родоначальников этих трёх семейств больше или сравним со временем жизни Земли (около 4,5 млрд лет). Эти «патриархи» изначально присутствовали в составе газо-пылевого облака, из которого сформировались Солнце и планеты. А родились они при взрывах сверхновых звёзд первого поколения (наше Солнце – это звезда второго поколения).

Конечные продукты распада трёх природных семейств – стабильные изотопы свинца (так называемый радиогенный свинец-206, 207 и 208). Помимо этих радиогенных изотопов, в земных породах присутствует стабильный «изначальный» свинец-204, не являющийся продуктом радиоактивных превращений. По содержанию радиогенного свинца в урановых рудах определяют возраст Земли (при этом предполагается, что изначально радиогенного свинца не было).

Во всех радиоактивных семействах период полураспада родоначальника гораздо больше, чем у его «потомков». В этих семействах установилось состояние векового равновесия, при котором убыль каждого члена семейства за любой промежуток времени компенсируется «прибылью» за счёт распада его непосредственного «предка». Только атомов родоначальника становится всё меньше и меньше, а конечного радиогенного свинца всё больше и больше. Но пока «патриарх» жив, живы и все его «потомки», причём их количество остаётся неизменным. Такое равновесие сохраняется до тех пор, пока не распадётся всё родоначальное вещество.

**В природной урановой руде содержатся целых два радиоактивных семейства со всеми их «потомками»: урана-238 и урана-235, причём львиная доля приходится на уран-238 и его потомков. Урана-235 осталось всего 0,7%, потому что период его полураспада в шесть с лишним раз меньше возраста Земли.**

Более лёгкие естественные радиоактивные изотопы – «бессемейные», после их распада сразу получается стабильное ядро. Среди них особо отметим калий-40 с периодом полураспада около 1,3 млрд лет. Калий – довольно распространённый химический элемент, он входит в состав многих минералов. Доля радиоактивного изотопа в природном калии везде постоянна и равна 0,012%. Калию в минералах всегда сопутствует рубидий, причём 28% природного рубидия составляет радиоактивный изотоп рубидий-87 с периодом полураспада 49 млрд лет (почти в 11 раз больше возраста Земли).

В земной коре присутствуют все естественные радиоактивные изотопы. За 4,5 млрд лет существования Земли большая часть урана-235 и калия-40 уже распалась, но рубидий-87 сохранился почти полностью, урана-238 распалась только половина и только пятая часть тория-232. Энергия, выделяющаяся при радиоактивных распадах, превращается в конечном счёте в тепло (поэтому образец, содержащий достаточно много радиоактивных изотопов, тёплый на ощупь). Общее количество тепла, произведённого радиоактивными изотопами, выступает как мощный энергетический фактор, способный повышать темпера-

туру глубоких недр Земли. 3–4 миллиарда лет назад радиоактивность Земли была гораздо выше и нагревала Землю сильнее.

## ВИДЫ РАСПАДОВ

Природные образцы руд являются источником всех трёх радиоактивных излучений:  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ . Это потому, что они содержат целые семейства радиоактивных изотопов. Но каждый конкретный изотоп претерпевает определённый тип распада (в немногих случаях возможны два канала распада одного и того же изотопа): для одних изотопов это  $\alpha$ -распад, для других –  $\beta$ -распад.

При альфа-распаде ядро «выплёвывает кусок», состоящий из двух протонов и двух нейтронов. Это и есть альфа-частица – очень прочное ядро гелия. Они вылетают из материнских ядер с огромной скоростью, но быстро расходуют свою энергию на ионизацию встречных молекул, «обрастают» электронами и становятся обычными атомами гелия. Альфа-распады элементов в земной коре – это постоянный и единственный поставщик гелия на Земле. Поставки невелики, так что гелий весьма дорогой газ.

При  $\beta$ -распадах из ядра с огромной скоростью вылетает электрон или его положительный двойник позитрон. Самое интересное, что исходно их в ядре не было! Откуда же они взялись? Электрон рождается при превращении одного из нейтронов ядра в протон. Если же, наоборот, протон превратился в нейтрон, вылетает позитрон. Одновременно с позитроном или электроном всегда рождается ещё одна частица – легчайшее и неуловимое нейтрино или антинейтрино. Но все виды нейтрино столь слабо взаимодействуют с веществом, что мы их просто не замечаем. Каждую секунду ваше тело пронизывают миллиарды нейтрино без каких бы то ни было последствий. Так что в дальнейшем в этом разделе о нейтрино больше упоминать не будем.

Гамма-кванты могут рождаться как в актах  $\alpha$ -распадов, так и при  $\beta$ -распадах. Это сопутствующее излучение.

**В земных радиоактивных семействах реализуются  $\beta$ -распады с рождением электронов. А в недрах Солнца по мере превращения ядер водорода в ядра гелия (именно этот термоядерный процесс является источником солнечной**

**энергии) происходят превращения протонов в нейтроны с рождением позитронов.**

## **ЧТО ТАКОЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ**

Третья составляющая понятия радиация – это космическое излучение. Оно было открыто в 1912 году, когда австрийский физик Виктор Франц Гесс поднялся в воздух на воздушном шаре и измерил концентрацию ионов воздуха на разной высоте. Ожидалось, что она будет падать, так как предполагалось, что ионизацию вызывают радиоактивные излучения земных недр. Но на большой высоте ионизация даже возрастала! Это означает, что некие ионизирующие излучения идут сверху, из космоса.

Верхние слои атмосферы бомбардируют первичные космические лучи – галактическое и солнечное излучения.

Галактическое излучение – это заряженные частицы громадных энергий. Для получения такого рода энергичных частиц в научных целях построили Большой адронный коллайдер (БАК), но ему далеко до галактических частиц! Нечасто, но в галактических лучах попадают частицы с энергиями, во много миллиардов раз превышающими максимальную энергию, которую обеспечивает БАК! Источником таких энергичных частиц, вероятно, являются взрывы сверхновых; затем частицы блуждают в Галактике, удерживаемые её мощными магнитными полями. 90% галактических лучей составляют протоны, 10% – ядра гелия и других лёгких атомов; относительно немного электронов и позитронов. Присутствуют и гамма-кванты.

**Космонавты на Международной космической станции (МКС) время от времени ощущают вспышки света в одном или другом глазу. Каждая вспышка вызвана попаданием в глаз галактической частицы с огромной энергией.**

Свой вклад в первичные космические лучи даёт и Солнце. Ежесекундно оно выбрасывает в окружающее пространство около одного миллиона тонн своего вещества: протонов, электронов и немного ядер гелия. Они образуют солнечный ветер, который вызывает возмущения геомагнитного поля и полярные сияния. При спокойном Солнце интенсивность солнечного космического излучения в 20 раз мень-

ше, чем галактического. Но во время мощных вспышек именно солнечные космические лучи представляют наибольшую опасность для космических путешественников и пассажиров самолётов.

Радиационные пояса Земли и атмосфера защищают нас от первичного космического излучения. До земной поверхности доходят лишь вторичные космические лучи. Они возникают в атмосфере в результате взаимодействия первичных частиц с ядрами молекул воздуха. Протоны высокой энергии, врезаясь в ядра, рождают большое число самых разных вторичных частиц, которые в свою очередь сталкиваются с ядрами и создают новые частицы... Такой каскад частиц называют широким атмосферным ливнем. До поверхности Земли долетают в основном лёгкие частицы: электроны, позитроны, нейтрино, гамма-кванты и некоторые другие. Протоны первичных лучей до поверхности не доходят. От одного галактического или солнечного протона с высокой энергией получается широкий атмосферный ливень, покрывающий площадь в несколько квадратных километров!

**По своим защитным свойствам земная атмосфера приблизительно эквивалентна 80-сантиметровому слою свинца.**

## **ГЛАВА 2. ДОЗЫ И РИСКИ**

Здесь мы обсудим: как радиация действует на человека и как можно измерить количественно это воздействие; что такое поглощённая, эквивалентная и эффективная дозы и каково действие на человека малых и больших доз облучения.

### **ИСТОРИЧЕСКИЕ ОШИБКИ**

В начале XX века меры безопасности не применялись ни при работе с рентгеновскими трубками, ни при контакте с радиоактивными веществами. Более того, эти передовые достижения науки вызывали неумеренный энтузиазм и стремление внедрить их не только в технику и медицину, но и в быт.

**В 1898 году Мария и Пьер Кюри открыли новый химический элемент — радий, радиоактивность которого была гораздо сильнее, чем у урана такой же массы. Радий (что значит «лучистый») — член уранового семейства, период его полураспада всего 1680 лет. Чистый металлический радий был впервые выделен в 1910 году. Тогда цена одного грамма радия соответствовала цене 160 кг золота! Это был самый дорогой металл. За сто лет во всём мире удалось выделить около 1,5 кг чистого радия.**

С 1920-х годов началась настоящая мода на радиоактивность. Радиация убивает микробов! Кроме того, обогащённые радием вещества самопроизвольно светятся (явление называется радиолюминесценцией). В рекламе тех лет сообщалось, что зубная паста с радием избавит от кариеса и придаст блеск зубам. Соли радия и тория добавляли в дорогую косметику и парфюмерию: кремы и пудры, мыло, соль для ванн, сосуды для обеззараживания воды... Выпускали сигареты с радием и даже продукты питания с радием! Радиоактивная минеральная вода, омолаживающие пилюли, шоколад... Радий использовался в производстве шерстяных изделий для детей и взрослых, подушек, одеял, матрасов. Считалось, что радиация способствует омоложению клеток тела.

Надо сказать, что по своим химическим свойствам радий похож на кальций. Попав в организм, он накапливается в костных тканях и разрушает их изнутри, испуская альфа-частицы. Кроме того, радий воздействует на костный мозг. Так что любители радиевой продукции в итоге сильно пострадали. К счастью, продукты радиевой индустрии были доступны только весьма состоятельным и поэтому немногочисленным людям. В 1932 году употребление радиевых «эликсиров здоровья» было запрещено.

Люминесценцию солей радия использовали для изготовления самосветящихся красок. Вплоть до 1960-х применялась так называемая светомасса постоянного действия на основе солей радия. Её наносили на шкалы часов, будильников, компасов, оружейных прицелов и всевозможных измерительных приборов, чтобы можно было их видеть в темноте. В отличие от фосфора, радиевая светомасса может светиться столетиями, ведь период полураспада радия 1680 лет! Если вам

попадётся старый прибор со светящейся в жёлто-коричневой гамме шкалой или ёлочная игрушка начала XX века с постоянно светящимся желтоватым рисунком, то скорее всего, это та самая радиевая краска. Дозиметр вблизи таких объектов показывает уровень гамма-радиации, в сотни раз превышающий фоновый. Но на расстоянии двух метров излучение уже не опасно.

**Сейчас радиевые краски не используют для шкал гражданских приборов — только для военных. Вместо радия применяют гораздо менее опасные изотопы с небольшими периодами полураспада и более мягким гамма-излучением.**

Для добычи одного грамма радия требуется переработать три тонны урановой руды. С расцветом радиевой индустрии появилось много «лишнего» урана. Он тоже нашёл себе применение. Различные химические соединения урана имеют самые разные цвета, причём очень яркие и насыщенные: оранжевый, жёлтый, красный, синий, зелёный и прочие. Это их свойство стали применять при изготовлении цветной глазури для керамической плитки, посуды, ювелирных украшений и даже предметов мебели. При отделке примерно четверти всех домов и квартир, построенных в США в 1920–1940 годы, использовались плитки с урановой глазурью. В глазурь керамической посуды чаще всего добавляли триоксид урана, имеющий ярко-оранжевый цвет. Такая посуда была популярна в 1930–1950 годы, она ещё сохранилась в некоторых в домах — проверьте свои шкафы!

Вплоть до 1950-х производилось также урановое стекло. Оно имеет красивый зеленоватый оттенок, красиво блестит, а при освещении ультрафиолетом ещё и флюоресцирует. Стекло с добавлением урана начали выпускать ещё в 1830-х, причём до Второй мировой войны использовался природный уран — минерал, содержащий, помимо урана, все радиоактивные члены урановых семейств и обладающий поэтому высокой активностью. Содержание такого урана в некоторых стёклах 1920-х годов достигало 25%! После войны, когда выпуск уранового стекла ненадолго был возобновлён, в него уже добавлялся чистый уран без «потомков», так что активность новых стёкол была гораздо ниже, а массовая доля урана обычно не превышала 2%. Из уранового стекла делали всевозможную посуду, а также украшения. Посуда

не представляет особой радиационной опасности для потребителя (особенно если хранится в серванте за стеклом); но вот стеклодувы, работавшие со стеклом, пострадали очень серьёзно.

**Урановое стекло перестали выпускать, главным образом, потому, что уран стал ценным стратегическим сырьём для военной промышленности, а также для атомных электростанций. К тому же стоимость урана очень сильно выросла.**

## **ДОЗЫ И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ**

Постепенно накапливались данные по негативному действию ионизирующих излучений на организм человека. Так, с середины 1920-х начали болеть работницы американской часовой фабрики, производящей часы с радиевой светомассой. Работницы смачивали слюной папироты, на которых разводили радиолюминесцентную краску, и вскоре у них начали выпадать зубы и разрушаться челюсти, были и смертельные исходы. Многие учёные – пионеры изучения радиоактивности – впоследствии умерли от хронической лучевой болезни. Ведь первичное действие радиации на организм не ощущается человеком (если доза не смертельна), симптомы лучевой болезни проявляются лишь спустя некоторое время.

**В 1934 году в возрасте 66 лет от лучевой анемии угасла Мария Кюри. Её дочь Ирен, также работавшая с радиоактивными препаратами, умерла от лейкемии.**

Чтобы контролировать воздействие радиации на человека, в 1921 году во многих странах были созданы национальные комитеты по защите от ионизирующих излучений. Они решали вопросы об измерении доз этих излучений и об их воздействии на живые и неживые объекты. Вскоре была введена первая единица измерения таких излучений – рентген (Р). Она характеризует способность излучения создавать ионы в сухом воздухе. С 1990 года эта единица не используется, однако вы можете ещё встретить старые дозиметры, отградуированные в рентгенах.

В процессе взаимодействия ионизирующего излучения с веществом часть энергии излучения поглощается. Именно поглощенная энергия — исходная мера вредности всех последующих процессов, которые в конечном итоге приводят к биологическим изменениям в живом организме. Количественно действие ионизирующего излучения (независимо от его природы) оценивается по энергии, переданной живым тканям.

Энергия ионизирующего излучения любого вида, поглощённая одним килограммом вещества, называется поглощённой дозой. Единица её измерения Дж/кг (мы не будем здесь приводить название этой единицы, чтобы не запутать читателя новыми словами).

Но при одной и той же поглощённой дозе степень поражения биологических тканей разными видами излучений ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -излучениями, рентгеновскими лучами, заряженными частицами космических лучей) различается. Чтобы учесть эти различия, ввели коэффициент относительной биологической эффективности  $K$  (можно было бы назвать его коэффициентом вредности). Для рентгеновского,  $\beta$  и  $\gamma$ -излучений  $K = 1$ . Альфа-излучение радиоактивных ядер при той же поглощённой дозе в 20 раз опаснее, потому что на единице своего пути альфа-частицы производят гораздо больше ионов. Для  $\alpha$ -излучения принято  $K = 20$ . Для всех других частиц в зависимости от их энергий имеются свои значения  $K$ .

Чтобы оценить совокупный вред всех видов излучений, ввели понятие эквивалентной дозы. Для её вычисления поглощённую дозу каждого вида излучений умножают на соответствующий данному виду коэффициент  $K$ , а потом всё суммируют — это и есть эквивалентная доза, количественная мера биологического воздействия облучения. Единицей её измерения является зиверт (Зв). Именно в зивертах мы будем приводить в дальнейшем значения тех или иных доз. При этом мы можем не конкретизировать, о каких видах излучений идёт речь, — достаточно числового значения эквивалентной дозы в зивертах.

**1 Зв — это энергия излучения, поглощённая одним килограммом биологической ткани, при которой её воздействие эквивалентно поглощенной дозе рентгеновского излучения 1 Дж/кг. Единица введена в 1963 году и названа в честь шведского специалиста в области дозиметрии**

## **и радиационной безопасности Рольфа Максимилиана Зиверта. Для сопоставления единицы «зиверт» с единицей «рентген» можно приблизительно принять $1 \text{ Зв} = 100 \text{ Р}$ .**

Наконец, есть ещё эффективная эквивалентная доза. Дело в том, что чувствительность разных органов к ионизирующим излучениям различна. Наиболее уязвимы половые железы, затем идут красный костный мозг, лёгкие, желудок и толстый кишечник. Это значит, что при облучении одной и той же дозой лёгкие могут пострадать сильнее, чем, скажем, щитовидная железа. Для каждого органа вводится свой коэффициент радиационного риска. Эквивалентную дозу умножают на коэффициент радиационного риска каждого из органов, а затем всё суммируют — получается эффективная эквивалентная доза. Она рассматривается как мера риска возникновения отдалённых последствий облучения. Измеряется также в зивертах. В дальнейшем мы будем иметь в виду именно эффективную эквивалентную дозу, которую для краткости зачастую будем называть просто дозой.

1 Зв — это весьма большая доза. В нормальной жизни мы сталкиваемся с дозами порядка миллизивертов ( $1 \text{ мЗв} = 0,001 \text{ Зв}$ ).

Мощность дозы — это доза, поглощаемая за единицу времени: секунду, час или год. Обычно она измеряется в микрозивертах в час ( $\text{мкЗв/ч}$ , где  $1 \text{ мкЗв} = 0,001 \text{ мЗв}$ ).

Для измерения доз ионизирующего излучения служат различные дозиметры. Бытовой дозиметр регистрирует гамма-излучение и  $\beta$ -частицы (электроны). Шкалы дозиметров градуируются в единицах дозы (мЗв) или мощности дозы (мкЗв/ч). Для регистрации альфа-излучения обычные дозиметры не годятся, так как альфа-частицы не могут пройти через окошко измерителя; тут нужны гораздо более дорогие альфа-радиометры.

Теперь, когда мы вооружены единицами измерения, можно говорить о степени вредности облучения при тех или иных эквивалентных эффективных дозах.

## **ВОЗДЕЙСТВИЕ БОЛЬШИХ И СРЕДНИХ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ**

Действие ионизирующих излучений на живые ткани никак не связано с их нагреванием, в отличие от действия неионизирующих излучений. Даже смертельная доза радиации, если перевести переданную

тканям энергию в тепло, нагрела бы тело лишь на тысячные доли градуса. В основе действия радиации на живые ткани лежит процесс ионизации молекул, приводящий к образованию химически активных радикалов. Они вступают в реакции с органическими молекулами клеток, вызывая химические изменения, в результате которых функционирование клетки нарушается. Наиболее чувствительны к облучению ядра клеток, а самые опасные последствия связаны с повреждением ДНК.

Ежегодно каждая клетка тела испытывает по крайней мере одно радиационное повреждение. Но организм умеет с ними справляться. Считается, что примерно 90% радиационных повреждений восстанавливается.

Если доза радиации превысит определённый порог (порядка 500 мЗв), может развиваться иммунодефицитное состояние, возрастает риск онкологии. Но не только. Большие дозы могут вызывать болезни сердца, инсульты, нарушение пищеварения и респираторные заболевания.

При единовременном облучении потенциально опасными считаются дозы, начиная примерно с 50 мЗв (0,05 Зв). Если облучаться постепенно, в течение года, то потенциально опасны дозы более 200 мЗв в год.

Влияние средних и больших доз радиации довольно хорошо изучено: чем больше доза, тем больше хромосомных повреждений и больше риск заболеваний. Эта простая линейная зависимость работает при дозах выше 300 мЗв. Влияние радиации при таких дозах носит накопительный характер.

Смертельной считается доза 5–6 Зв, полученная за короткий промежуток времени. Большинство людей такая доза убивает, но кто-то выживает, так как все отличаются по своей радиационной устойчивости. Так, некоторые ликвидаторы, работавшие в подвалах Чернобыля, получили дозы до 10 Зв, но остались живы. Вероятно, повышенная радиорезистентность отдельных индивидов имеет генетическую природу.

**Некоторые простые организмы — насекомые, черви, растения — обладают паразитерной радиационной устойчивостью. Например, микроскопические**

**беспозвоночные тихоходки выдерживают дозы радиации до 5000 Зв! Учёные надеются выявить «ген радиационной устойчивости». Возможно, в далёком будущем само выживание человечества будет возможным лишь при повышении радиорезистентности популяции.**

Средние и высокие дозы лучше растянуть на как можно больший срок, чтобы у организма было время на починку повреждений. Так, если получить единовременно дозу 1 Зв, лучевая болезнь разовьётся в 50% случаев. Но если такую дозу набирать постепенно, за 50–70 лет (в год получается по 15–20 мЗв), то скорее всего обойдётся без неблагоприятных последствий.

При более низких дозах всё не так однозначно: одна и та же доза, поглощённая в течение разных промежутков времени, оказывает разное действие. Так, дозу 10 мЗв (возможная доза при медицинской компьютерной томографии грудной клетки) лучше получить сразу, не растягивая, скажем, на месяц, тогда организм лучше справится с последствиями повреждений. А доза 150 мЗв, полученная хоть сразу, хоть частями, несёт примерно одинаковые риски возникновения раковых заболеваний. К сожалению, нормы радиационной безопасности таких нюансов не учитывают.

Кроме того, надо различать внешнее и внутреннее облучения. Второе гораздо опаснее.

При внешнем облучении наибольшую опасность представляют  $\gamma$ -лучи, так как они проникают в ткани на большую глубину. Внешнее  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения менее опасны, так как они не достигают внутренних органов человека. Альфа-излучение поражает кожу и роговицу глаза;  $\beta$ -излучение проникает в живые ткани на несколько сантиметров. Иногда его применяют в лучевой терапии для лечения поверхностных опухолей.

Внутреннее облучение возникает, когда радиоактивные изотопы попадают в организм с воздухом, водой, пищей, через открытые раны и ожоговые поверхности. Оно поражает все органы. При внутреннем облучении опасны все виды радиации.

## ОСОБЕННОСТИ МАЛЫХ ДОЗ

Есть две основные точки зрения на малые дозы. Первая: сколь угодно малые дозы несут опасность, и чем меньше радиации, тем лучше (линейная беспороговая теория). Вторая: до определённого порога малые дозы не опасны и даже полезны.

Сейчас больше склоняются ко второй точке зрения. Опыты на животных и растениях, которых экранировали от радиации, показали, что они хуже развиваются. Если же создать на какое-то время уровень радиации чуть выше фонового, то жизнеспособность организмов даже повышается. Такое стимулирующее гамма-облучение стали использовать для повышения всхожести семян и жизнестойкости эмбрионов домашних птиц. Ещё пример: камень сердолик издавна ценится как охраняющий от болезней. Между тем он умеренно радиоактивен.

Есть специальный термин: гормезис. Это стимулирующее действие определённых малых доз стрессового фактора, не только радиации. Например, обливание холодной водой – это тоже гормезис. Кратковременный стресс провоцирует защитную реакцию организма. Ключевое слово – кратковременный. Что касается величины стимулирующих доз, то это дело индивидуальное (кто-то обливается прохладной водой, а кто-то купается в проруби). В те времена, когда ничего ещё не знали о радиации, уже использовали явление гормезиса. Так, радоновые озёра, в воде которых растворён радиоактивный газ радон и которых много на северо-западе нашей страны, всегда считались целебными, особенно при кожных заболеваниях. А многие известные курорты (Пятигорск в Ставропольском крае, Белокуриха на Алтае, Цхалтубо в Грузии, Висбаден, Баден-Баден в Германии и другие) отличаются повышенным радиационным фоном.

Длительное действие очень малых доз радиации, как это ни парадоксально, может быть хуже, чем действие умеренно слабых доз. Дело в том, что слишком слабое воздействие радиации наш организм просто не распознаёт, «не бьёт тревогу» и не включает механизмы защиты от повреждений, которые постепенно накапливаются и накапливаются.

Учёные пришли к выводу, что те малые дозы облучения, которые создаются естественным радиационным фоном, нам необходимы, как необходимы естественные электромагнитные поля.

**30–35 тысяч лет назад, когда вид «человек разумный» только-только появился, естественный радиационный фон на Земле был выше современного в несколько раз. Возможно, это было связано со вспышкой недалёкой сверхновой.**

## **ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ДОЗЫ**

К определению максимальных безопасных доз облучения, не повышающих риска болезни в долгосрочной перспективе, подбирались постепенно, «наощупь».

В 1928 году была организована Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ), которая стала предлагать свои рекомендации по нормированию излучений и мерам радиационной защиты. В 1934 году эта комиссия рекомендовала ограничить облучение персонала, работающего с рентгеновскими и радиоактивными источниками, предельной дозой 500 мЗв в год. Эта рекомендация была просто ужасна! За 10 лет при таком облучении набирается смертельно опасная доза 5 Зв. Человек, ежегодно получавший такую дозу, не умирал от острой лучевой болезни, потому что это не единовременное облучение, а об отделённых последствиях тогда почти ничего не знали.

В 1948 году Международная комиссия по радиологической защите установила понятие предельно допустимой дозы (ПДД). ПДД – это такая доза, которая при непрерывном облучении в течение 50 лет не должна вызывать клинически выявляемые повреждения человеческого организма. Исходя из этого определения, в 1958 году была рекомендована ПДД для профессионалов: до 50 мЗв в год. Сейчас эта норма снижена до 20 мЗв в год.

Тогда же было впервые рекомендовано ограничение дозы техногенного облучения для населения в целом: 5 мЗв в год. В настоящее время эта рекомендация снижена до 1 мЗв в год. Мы ещё вернёмся к обсуждению действующих в нашей стране ПДД для населения позже, после того, как поговорим о естественном радиационном фоне. Ведь именно его среднее значение служит отправной точкой для рекомендаций по ограничению техногенного облучения.

**Международная комиссия по радиологической защите — некоммерческая организация, в которой на добровольной**

основе работает более двухсот авторитетных специалистов. Большинство стран, включая Россию, учитывает рекомендации этой комиссии при разработке национальных стандартов радиационной безопасности.

## ГЛАВА 3. ЕСТЕСТВЕННЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ ФОН

Естественные источники радиации можно разделить на две основные группы: источники земного происхождения (они обеспечивают в среднем около 85% эффективной эквивалентной дозы) и космические лучи (около 15%). Около двух третей полученной от всех естественных источников дозы приходится на внутреннее облучение.

Естественный радиационный фон сильно отличается для разных географических мест и на разных высотах над уровнем моря. В этой главе мы обсудим основные составляющие этого фона и причины таких различий.

### ИСТОЧНИКИ ЗЕМНОЙ РАДИАЦИИ

Забудем на время про космическое излучение и поговорим о земной радиации. От земных источников население Земли получает в среднем эффективную эквивалентную дозу 2 мЗв в год, в основном от почвы и воздуха. Но в одних местах уровень радиации может быть гораздо выше среднего, в других – ниже. Это зависит от концентрации радиоактивных веществ в том или ином участке земной коры. Есть отдельные места (пляжи в Бразилии, Индии и Китае) с очень высоким фоном, достигающим 250 мЗв в год! Этот гигантский фон связан с чёрным песком, содержащим много тория и радия. Большинство населения Земли живёт в местах с небольшим радиационным фоном (менее 1 мЗв год), но на некоторых территориях обитатели получают 15–20 мЗв в год (мы ещё вернёмся к разговору о таких местах).

**Запомним эти средние фоновые значения: 2 мЗв в год, или 0,22 мкЗв в час (бытовые дозиметры обычно показывают мощность дозы в мкЗв/ч).**

Высоким считается уровень естественного облучения более 5 мЗв/год (0,6 мкЗв/ч).

Перечислим основные источники земной радиации.

- 1) Радиоактивность земных недр. Основной вклад в неё дают уран, торий, калий-40 и рубидий-87. Земная поверхность обеспечивает нам в среднем 0,35 мЗв внешнего гамма-облучения, потому что только это излучение может «вырваться наружу» из земных недр.
- 2) Среди продуктов распада урана и тория есть радиоактивные газы радон и торон, которые просачиваются из земной коры в атмосферу, а оттуда – в наши лёгкие. Именно эти газы и продукты их распада являются виновниками львиной доли естественного внутреннего облучения. Мы ещё вернёмся к более подробному разговору о них.
- 3) Радиоактивные изотопы в еде и воде – тоже источники внутреннего облучения. Все продукты питания содержат те или иные радиоактивные изотопы и обеспечивают нам один или несколько процентов годовой эффективной дозы. Так, мы уже упоминали радиоактивный калий-40, всегда сопровождающий «обычный» калий. Всё, что богато калием, имеет повышенную радиоактивность: самые обычные бананы, курага и прочие продукты. Чемпионом по радиоактивности среди растительных продуктов считается бразильский орех: он в 3,5 раза активнее бананов того же веса и содержит, помимо радиоактивного калия, изотопы радия. Радиоактивные изотопы свинца и полония концентрируются в рыбе и моллюсках. Фосфатные удобрения, содержащие уран, обеспечивают радиоактивность овощей и фруктов, а также животных продуктов. В воде, особенно артезианской, может быть растворено больше или меньше радона (но он легко удаляется кипячением).
- 4) Радиоактивность собственного тела. 0,2% массы нашего тела составляет калий, в том числе радиоактивный калий-40. Он сосредоточен главным образом в мышечной ткани, его вклад в годовую дозу – около 0,2 мЗв. Способов избавиться от радиоактивного калия в наших телах не существует.

Отметим ещё радиоактивный изотоп углерод-14 (радиоуглерод), постоянно образующийся в атмосфере под действием галактического космического излучения и попадающий в живые организмы с возду-

хом и едой. Хотя его вклад в совокупную дозу невелик, он весьма опасен. Беда в том, что радиоуглерод наряду с обычным углеродом по пищевым цепочкам проникает во все органы и ткани, а также в молекулы ДНК. Когда же углерод-14 в молекуле ДНК распадается, превращаясь в азот, состав ДНК изменяется, то есть происходит генная трансмутация, и это необратимый процесс. Такие изменения не восстанавливаются репаративной системой организма. Радиоуглерод — один из важных факторов, определяющих темп старения человека.

**В годы повышенной солнечной активности концентрация радиоуглерода в атмосфере уменьшается, так как солнечный ветер частично защищает Землю от галактических частиц высоких энергий. Максимальные концентрации радиоуглерода наблюдались в 1945–1963 годах в связи с испытаниями ядерного оружия в атмосфере. Это привело к сокращению жизни людей — современников этих испытаний.**

Хотя всё перечисленное является естественными источниками облучения, в каких-то пределах у нас есть выбор: где жить, что есть и пить.

## **РАДОН — ГЛАВНЫЙ ВИНОВНИК ЗЕМНОЙ РАДИАЦИИ**

Один из продуктов распада уранового ряда — радон, радиоактивный газ без запаха и цвета, то есть мы не можем почувствовать его присутствие. Это инертный газ, как гелий или неон, не вступающий в химические реакции с другими веществами. Его период полураспада равен 3,8 суток. Он постоянно просачивается в атмосферу из почвы, скальных пород и стройматериалов.

Радон вместе со своими продуктами распада, тоже радиоактивными, отвечает более чем за половину дозы облучения от всех естественных источников. Дозы облучения в основном обусловлены вдыханием не самого радона, а короткоживущих дочерних продуктов его распада — изотопов полония, висмута и радиоактивного свинца. Попадая в дыхательные пути и частично оседая там, они облучают нас изнутри и вызывают радиационные повреждения лёгких и бронхов, что намного увеличивает риск заболеть раком лёгких. Многие ученые счита-

ют радон второй по значимости (после курения) причиной рака лёгких у человека. В сочетании с табачным дымом онкогенный эффект действия радона и продуктов его распада возрастает в несколько раз.

Радон высвобождается из земной коры через трещины или с грунтовыми водами повсеместно, но его содержание в воздухе сильно отличается в разных местах земного шара и зависит от состава пород. Радон особенно активно выделяется в зонах разломов, которые представляют глубокие трещины в верхней части земной коры. Вообще, любые нарушения структуры земной коры, например, глубокие скважины, могут быть источниками поступления радона в атмосферу. В России есть радоноопасные регионы (Москва к ним не относится). Это отдельные районы Карелии и Ленинградской области, Кольский полуостров, Алтайский край, Уральский регион, зона Кавказских минеральных вод. Радоновые карты России вы можете найти в Интернете.

**По данным Роспотребнадзора, средняя по России мощность дозы облучения от всех природных источников за период 2001–2019 г. составила 3,6 мЗв/год. Это больше среднемирового значения почти в 1,5 раза. Виновник превышения — радон, на него приходится средняя годовая доза 1,7 мЗв. В радоноопасных районах годовые дозы достигают 5–10 мЗв.**

Миллионы французов, австрийцев, испанцев, шведов и финнов живут в местах, где содержание радона в наружном воздухе гораздо выше среднего. А филиппинцам, боливийцам и японцам, наоборот, повезло: у них концентрации радона ниже средней.

Вероятно, организмы жителей, веками населяющих территории с высоким естественным радиационным фоном, давно адаптировались к повышенному уровню радиации. По крайней мере, эксперименты на мышах, находившихся длительное время в условиях повышенной радиации, показали, что к 40-му поколению вся популяция становится радиационно устойчивой, а некоторый её процент выдерживает даже смертельные дозы. Может быть, астронавтов для далёких космических путешествий будут набирать из жителей районов с повышенной концентрацией радона?

Посещать такие места вполне безопасно (вспомним про радиационный гормезис), но переезжать на постоянное жительство из мест с гораздо более низким радиационным фоном, возможно, неразумно.

## **РАДОН В ДОМАХ**

Как это ни странно, основную часть дозы облучения от радона мы получаем, находясь в закрытых помещениях. Концентрация радона в домах обычно в несколько раз выше, чем в наружном воздухе, а иногда во много раз выше. Часть радона попадает в здания из наружного воздуха, но главный источник его поступления в дома — это грунт и строительные материалы. Радон просачивается в подвалы через фундамент и пол, а так как он в 7,5 раз тяжелее воздуха, то скапливается в плохо проветриваемых подвалах, проникая через микрощели и трещины на нижние этажи, а через вентиляционные системы — на более высокие этажи. Герметизация помещений с целью утепления сильно ухудшает ситуацию с радоном.

**В 1970-е годы во время энергетического кризиса в странах Северной Европы чересчур увлеклись герметизацией жилых домов. В результате концентрация радона в некоторых частных домах в Швеции и Финляндии превышала наружную в 5000 раз!**

Даже в рядом стоящих зданиях концентрация радона может различаться в десятки раз. Это сильно зависит от наличия в грунте разломов и трещин, от проницаемости почвы для радона, мощности и глубины залегания ураносодержащих пород. В регионах с повышенным выделением радона при проектировании домов предусматривается установка специальных радоноизолирующих перекрытий, препятствующих попаданию радона из грунта в здание.

На первый взгляд кажется, что чем выше этаж, тем меньше там должно быть радона. Однако измерения показали, что зависимость концентрации этого газа от высоты не столь проста. По прихоти домово́й вентиляционной системы радона на высоком этаже может быть не меньше, чем внизу здания.

Иногда повышенные концентрации радона в помещениях бывают связаны с качеством строительных и отделочных материалов, использованных при постройке или ремонте дома. К счастью, самые распро-

странённые материалы — дерево, кирпич и бетон — выделяют мало радона (причём силикатный кирпич в этом отношении лучше красного). Относительно большой радиоактивностью обладают гранит, туф и пемза. Ещё более радиоактивны глинозёмы, которые до 1970-х использовались, к примеру, в Швеции при производстве бетона. Эти материалы создают как внешнее гамма-облучение, так и внутреннее за счёт выделения радона.

**Центральный вокзал Нью-Йорка отличается своим высоким радиационным фоном благодаря граниту, из которого построены основание и стены. Повышение уровня радиации фиксируется также на любых гранитных набережных и скамейках. Но всё это в пределах безопасных доз.**

Ещё один, хотя и менее существенный, источник поступления радона в наши дома — это вода. В обычной водопроводной воде радона мало, но в воде из глубоких артезианских скважин может быть растворено много радона. Основная опасность происходит не от потребления воды, а от попадания паров такой артезианской воды в лёгкие вместе с воздухом, что чаще всего происходит в ванной комнате. Через несколько минут работы душа концентрация радона в ванной комнате может стать в десятки раз выше, чем в остальных помещениях, и лишь через 1,5 часа она снизится до исходного уровня (ведь, как правило, вентиляция ванных комнат затруднена).

Радон содержится в природном газе. Его концентрация в помещении может заметно возрасти, если кухонные плиты, отопительные и водонагревательные приборы, в которых сжигается газ, не снабжены вытяжкой.

Радон в жилых домах является серьёзной угрозой здоровью. Что можно сделать для уменьшения его концентрации в зданиях:

- улучшить вентиляцию домов, особенно подвалов,
- герметизировать полы и стены подвалов,
- герметизировать стыки полов и стен на всех этажах.

Содержание радона (вместе с продуктами его распада) измеряют с помощью специальных датчиков радона, которые показывают, сколько распадов происходит за секунду в одном кубометре воздуха. Немного цифр для ориентировки. Среднемировое содержание радона

в помещениях создаёт активность 45 распадов в секунду на кубометр воздуха. На территории РФ концентрация радона в помещениях изменяется от 11 (Архангельская область) до 250 (Республика Горный Алтай) распадов в секунду на кубометр. Действующий норматив для новых жилых домов — 100 распадов в секунду на кубометр, а для уже эксплуатируемых жилых зданий — 200 распадов в секунду на кубометр. Если активность радона в жилищах превышает 200 распадов в секунду на кубометр, у жителей регистрируется рост частоты рака лёгких.

Казалось бы, чем меньше радона в домах, тем безопаснее для их обитателей. Но недавно были проведены интересные исследования в Венгрии и США. В результате очень большого числа измерений активности радона в типичных домах выяснилось, что минимум частоты рака наблюдается не при минимуме радона в жилищах, а при 110–185 распадах за секунду на кубометр. Видимо, это проявление радиационного гормезиса. Так что исследования продолжаются.

**В межсезонье, когда уже похолодало, но отопление ещё не включили, содержание радона в домах возрастает. Почему? Потому что люди реже открывают окна.**

Главная и простая рекомендация для всех: чаще проветривайте помещение, и вы сможете быть спокойны насчёт радона.

## **КОСМИЧЕСКАЯ РАДИАЦИЯ НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ**

Чем выше над уровнем моря, тем больше интенсивность космического излучения, ведь толщина защитного слоя воздуха уменьшается. Если на уровне моря космическое излучение обеспечивает нам среднюю эффективную дозу 0,3 мЗв в год, то на высоте 4 км (максимальная высота, на которой ещё встречаются человеческие поселения) эта доза возрастает до 2 мЗв в год, то есть сравнивается со средней годовой дозой от земной радиации. Мощность дозы на высоте 12 км в 25 раз выше, чем в среднем на поверхности Земли.

Все пассажиры и экипаж авиалайнеров подвергаются добавочному облучению, ведь корпус и внутренняя обшивка самолёта практически не ослабляют космическое излучение, а делать корпус толще для защиты от него нерентабельно. Полученная в самолёте доза пропорциональна времени полёта; она также зависит от состояния солнечной

активности, высоты и широты, на которых происходит полёт. В приполярных маршрутах мощность дозы существенно выше, так как именно здесь быстрые заряженные частицы космических лучей проникают ближе всего к поверхности Земли. В средних широтах в отсутствие солнечных выбросов при полёте на высоте 10 км мощность дозы составляет 3 мкЗв в час; при подъёме на высоту 11 км будет уже 4 мкЗв в час, на высоте 12 км (максимальная высота полёта авиалайнеров) — более 6 мкЗв в час. При солнечных вспышках и выбросах мощность дозы возрастает во много раз. Но если вы летаете не очень часто, то о добавочном космическом облучении можете не беспокоиться.

**За 20 трёхчасовых перелётов в спокойных радиационных условиях вы получите суммарную дозу около 0,2 мЗв, что в 10 раз меньше средней годовой дозы от естественных источников и немного меньше дозы от одного рентгеновского снимка лёгких на плёнку.**

Для членов экипажей самолётов установлен профессиональный норматив: не более 5 мЗв в год. Правда, выполнение этого норматива весьма трудно контролировать, потому что кабины пилотов не оснащены дозиметрами. В советское время пилотам не разрешалось летать более 70 часов в месяц; сейчас эта норма увеличена до 90 часов. Исследования, проведённые западными медиками, показали: у пилотов, налетавших более 5000 часов (и получивших вследствие этого дополнительные дозы более 20 мЗв), уровень заболеваемости раком крови, лейкемией и меланомой повышен на 20–30%. У стюардесс, летающих более 15 лет, вероятность заболеть раком лёгких возрастает на 30%.

Ещё большему космическому облучению подвергаются космонавты. Полёты на околоземных орбитах проходят выше границы плотной атмосферы, но всё же под защитой радиационных поясов, которые простираются от высот 300 км до 40 тысяч км над поверхностью Земли. За сутки космонавт МКС (высота орбиты около 400 км) получает от 0,3 до 0,8 мЗв, за год набирается около 200 мЗв, что в 10 раз превышает профессиональный норматив работников атомной промышленности. А если на Солнце случается мощный протонный выброс, космонавт получает дополнительно до 30 мЗв. К счастью, такие события происходят не чаще одного-двух раз

за 11-летний цикл солнечной активности. Астрофизики давно и упорно ищут способы предсказывать такие события, но пока задача не решена.

Ещё острее стоит проблема радиационной защиты при разработке планов колонизации других планет. За полгода пребывания на поверхности Марса человек получит среднюю дозу излучения около 120 мЗв. Эта цифра сопоставима с дозой облучения за такой же срок на МКС. На Луне доза облучения вдвое выше. Марсианина всё же защищает атмосфера, хоть она и разреженная, магнитного же поля у Марса практически нет. А на Луне нет ни того, ни другого. Но за время перелёта к Марсу, если он также займет полгода, доза облучения составит уже 350 мЗв, если не будут приняты специальные защитные меры. Возможно, придётся устанавливать защитное покрытие на жилой модуль космического корабля или хотя бы на отдельный «штормовой» отсек, в котором космонавты смогут пережить мощные солнечные выбросы.

## **ГЛАВА 4. ТЕХНОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИИ**

С середины XX века люди начали использовать атомную энергию и сотни искусственно созданных радиоактивных изотопов в самых разных целях, главные из которых – атомное оружие, производство энергии, медицинские исследования и лечение. Это привело к увеличению доз облучения людей.

### **ИСТОЧНИКИ И НОРМЫ ТЕХНОГЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

Перечислить все источники техногенного облучения населения сложно, да и не всегда понятно, к какому типу отнести тот или иной источник – естественному или техногенному (например, строительные материалы, или радиоактивность пищи, обусловленная ядерными взрывами, или полёты на самолётах). Вот приблизительный перечень основных техногенных источников радиации:

- медицинские исследования и процедуры,
- последствия ядерных взрывов в атмосфере,
- сжигание угля,
- фосфатные удобрения, содержащие уран,
- атомная энергетика, включая добычу и переработку руды,

- курение,
- радиоактивные предметы быта,
- сканеры на транспорте.

Для обычного человека, чья профессия не связана с повышенным облучением, годовая доза от техногенных источников обычно в несколько раз меньше дозы от естественных источников. Для разных людей дозы техногенного облучения отличаются друг от друга гораздо сильнее, чем дозы от естественного облучения. К примеру, кто-то делает ежегодную флюорографию, а кто-то нет, кто-то курит, а кто-то нет... Что касается ранжирования техногенных источников по степени значимости, то это тоже очень индивидуально. Мы будем в дальнейшем приводить некие усреднённые значения доз.

Федеральный закон о радиационной безопасности населения в настоящее время устанавливает предельную годовую эффективную дозу для техногенного облучения населения, равную 1 мЗв. При этом оговаривается, что в отдельные годы допустимы большие значения при условии, что средняя годовая доза за пять последовательных лет не превысит 1 мЗв. Это значит: если вы в какой-то год получили 5 мЗв, то следующие четыре года не должны подвергаться никакому техногенному облучению. Важно подчеркнуть: предельная доза 1 мЗв не включает в себя дозы, полученные при проведении рентгенорадиологических процедур и лечения, — эти дозы оговариваются отдельно.

При проведении *профилактических* рентгенорадиологических обследований (*то есть обследований здоровых людей*) рекомендовано ограничить дозы облучения до величины 1 мЗв в год. Что касается лечения больных людей, то здесь решения о применяемых дозах принимают врачи — пределы доз не устанавливаются.

Несмотря на все индивидуальные различия, можно с определённой степенью сказать одно: главный источник техногенного облучения в современной жизни — это медицина.

## МЕДИЦИНА КАК ИСТОЧНИК ОБЛУЧЕНИЯ

Здесь мы не будем говорить о применении радиоактивных изотопов, рентгеновского и прочих облучений при лечении онкологических заболеваний, а только о здоровых в принципе людях.

В 2019 году средняя годовая доза от медицинских обследований составила для жителя Российской Федерации 0,56 мЗв. Это около 14%

суммарной дозы от всех источников — как естественного, так и искусственного происхождения. Это весьма большой процент, причём начиная с 2013 года он с каждым годом увеличивается (эта тенденция присуща всему мировому сообществу). В США и развитых европейских странах доля медицины в облучении ещё больше. Так, в США уже в 2006 году средняя годовая доза медицинского облучения составила 3 мЗв на жителя (55% полной эффективной дозы).

Давайте посмотрим, какую лучевую нагрузку дают распространённые медицинские процедуры. Для начала немного истории.

Период развития рентгенодиагностики во всём мире начался с 1912 года. В России первая в мире специализированная рентгенологическая клиника открылась в 1918 году. Но по-настоящему массовые рентгеновские обследования начались после Второй мировой войны, когда ежегодная флюорография грудной клетки стала нормой жизни промышленно развитых стран (это было связано с ростом туберкулёза во всём мире).

При флюорографии рентгеновские лучи, прошедшие сквозь грудную клетку, создают светящееся теневое изображение на специальном флуоресцентном экране. Это изображение фотографируется с уменьшением на обычную фотоплёнку. Разрешающая способность метода невелика, к тому же используется более жёсткое (а значит, более вредное) рентгеновское излучение, чем при обычной рентгенограмме — фиксации изображения в натуральную величину на специальной рентгеночувствительной плёнке, которая гораздо дороже. Старые аппараты для флюорографии давали дозу 0,6–0,8 мЗв за один снимок. Эти аппараты могут ещё кое-где использоваться! Доза за плёночную рентгенографию лёгких (то есть за прямой снимок на рентгеночувствительную плёнку, без посредничества экрана) меньше: 0,15–0,4 мЗв. Основные преимущества флюорографии по сравнению с рентгенографией — дешевизна и большая пропускная способность (один человек в минуту). К 1980-м годам в большинстве развитых стран, но не в СССР, такие ежегодные флюорографические обследования были признаны нецелесообразными. Практика показала, что обнаружение рака лёгких с помощью флюорограммы почти не увеличивает шансов на выживание пациента, так как выявляет его лишь на достаточно поздних стадиях и не оправдывает облучения больших масс населения.

А в конце XX века произошла настоящая революция в рентгенодиагностике: на смену плёночным изображениям пришли цифровые. Это позволило сократить дозы облучения в пять-десять раз, одновременно повысив разрешающую способность. И флюорограммы, и рентгенограммы стали цифровыми. С каждым годом цифровых рентгеновских аппаратов становится больше. Можно надеяться, что вскоре они совсем вытеснят с рынка плёночные аппараты.

**Примерные дозы облучения на современных рентгеновских аппаратах: — плёночная флюорограмма — 0,15–0,5 мЗв, — цифровая флюорограмма — 0,06 мЗв, — плёночная рентгенограмма лёгких — 0,3 мЗв, — цифровая рентгенограмма лёгких — 0,03 мЗв.**

Весьма большие дозы за процедуру (2–6 мЗв) даёт рентгеноскопия — рентгеновское просвечивание с получением изображения на флуоресцентном экране в реальном масштабе времени (от двух до пятнадцати минут). При этом пациент может поворачиваться, что позволяет врачу видеть теневые изображения органов в разных проекциях. Сейчас вместо рентгеноскопии чаще применяется рентгентелевизионное просвечивание, когда лучи попадают не на экран, а на усилитель рентгеновского изображения, которое затем преобразуется в оптическое (видимое) изображение и выводится на экран монитора.

Самым большим достижением в разработке методов рентгеновской диагностики стала компьютерная томография (КТ). Томография, хоть магнитная, хоть рентгеновская — это получение послойных изображений части тела (срезов). Для получения таких срезов стол, на котором лежит пациент, поступательно перемещается, а узкий рентгеновский луч сканирует тело слой за слоем. Излучение, прошедшее сквозь тело, преобразуется в электрические сигналы, которые записываются и передаются на монитор компьютера. Имея достаточное число срезов (300–400, иногда и более), компьютер может создать 3D-реконструкцию органов.

В настоящее время именно КТ вносит самый большой вклад в коллективную медицинскую дозу — более половины. За последние 15 лет этот вклад возрос почти в десять раз! Такой гигантский вклад связан не с большим числом процедур КТ, а с большими индивидуальными

дозами при каждой процедуре. В 2019 году КТ-исследования составляли всего 4,5% от общего числа рентгеновских обследований, в 2020 году в связи с наступлением пандемии число процедур КТ возросло минимум вдвое. Эффективная доза за одно исследование колеблется от 0,1 мЗв (при томографии конечностей) до 30 мЗв (при томографии органов брюшной полости с контрастом). А 30 мЗв — это доза, эквивалентная тысяче цифровых рентгенограмм (или полторы предельных годовых дозы работника атомной промышленности). Самое распространённое сейчас КТ грудной клетки даёт 4–6 мЗв за процедуру, то есть пятилетний рекомендуемый лимит на диагностическое медицинское облучение.

Специалисты не советуют назначать столь «нагрузочные» процедуры, как рентгеноскопия и КТ, без настоящей необходимости.

**В ряде развитых стран (США, Японии, Германии) доза облучения от КТ-исследований в пересчёте на одного жителя в пять раз выше, чем в России.**

## **ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ В АТМОСФЕРЕ**

Казалось бы, это дела давно минувших дней: ведь ядерные взрывы в атмосфере прекращены развитыми странами к 1980 году; Индия и Пакистан осуществили разовые испытания в конце 1990-х. Но плоды всех этих взрывов мы пожинаем до сих пор.

Испытания ядерного оружия привели к глобальным экологическим последствиям, повысив радиационный фон практически на всей поверхности земного шара. В атмосферу, а затем и в биосферу впервые попали радиоактивные вещества техногенного происхождения.

Особенно большой вред нанесли ядерные взрывы в атмосфере. Всего было произведено около 550 таких взрывов. Их пик пришёлся на 1954–1958 и 1961–1962 годы. Большая часть радиоактивного материала при надземном взрыве выбрасывается не только в тропосферу (прилегающий к земле слой атмосферы), но и в стратосферу (самые высокие слои атмосферы), где остаётся многие месяцы и годы, медленно опускаясь и рассеиваясь по всей земной поверхности. Но всё же на Северное полушарие, где проводилось большинство испытаний, выпала большая часть радиоактивных осадков. Среди них основной

вклад в делящееся по сей день облучение дают три долгоживущих изотопа: углерод-14, цезий-137 и стронций-90. Период полураспада углерода-14 равен 5730 лет, цезия и стронция — около 30 лет. Цезий и стронций медленно смывались с поверхности, уходили с подземными водами, а затем попадали в растения через корневую систему. В итоге они накапливались в зерновых продуктах, картофеле, сене и мясе, меньше — в овощах и фруктах. В 1963–1964 годах содержание цезия и стронция в продуктах питания было во много раз выше обычного. Попав в организм, цезий оседает в костной ткани, а стронций — в мышечной. Они облучают органы и ткани изнутри и очень медленно выводятся. К концу XX века распалось около половины радиоактивных цезия и стронция, выпавших в те годы, к настоящему времени — около трёх четвертей. А чрезвычайно опасный углерод-14 задержится в биосфере на тысячелетия. До сего дня мы не получили всей дозы облучения, вызванного радиоактивными осадками, а будем получать её ещё много лет.

**В 1965–1990 годы смертность от раковых заболеваний возросла в СССР на 12,5%, а в Новосибирской области и Алтайском крае, граничащих с Семипалатинским ядерным полигоном, — более чем на 30%. Эти лишние проценты — «эхо» ядерных взрывов.**

## **ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ**

Начнём с того, что атомная энергетика — не только атомные электростанции (АЭС), это весь ядерный топливный цикл. Он начинается с добычи и обогащения урановой руды, из которой после переработки и очистки производится ядерное топливо, и только потом реализуется основная цель — высвобождение энергии в процессе цепной реакции деления. Отработанное на АЭС топливо является ценным ресурсом: из него извлекают уран и плутоний, а также целый ряд продуктов деления, которые применяются в промышленности, медицине и научной работе. Завершающей стадией цикла является, как правило, захоронение радиоактивных отходов, образующихся практически на всех стадиях цикла.

**Что такое обогащение урана? в естественной смеси изотопов урана цепная реакция невозможна. Для распространённых реакторов на медленных нейтронах требуется довести долю чрезвычайно редкого изотопа урана-235 до 5%, а для современных реакторов-размножителей — до 15%. Этот процесс и называют обогащением. Обогащение урана — очень длительный и дорогостоящий процесс, связанный к тому же с радиоактивным загрязнением окружающей среды. В будущем, по мере накопления запасов плутония (трансуранового элемента номер 94, получаемого в реакторах-размножителях), ядерным топливом будет служить смесь естественного урана с плутонием.**

На каждом этапе ядерного топливного цикла происходит выделение в окружающую среду радиоактивных веществ, причём основное загрязнение связано с добычей и обогащением урановой руды, а также с переработкой отработанного топлива. Так, дополнительные дозы облучения людей, проживающих вокруг предприятий по переработке ядерного топлива на расстоянии до 200 км, могут достигать 65% естественного радиоактивного фона. А население, живущее вблизи АЭС, при её нормальной эксплуатации получает дозу менее процента от естественного фона. Если же «размазать» получаемые от всего ядерного цикла дозы облучения по всему населению Земли, то получится около 1 мкЗв в год на человека, то есть несколько сотых процента дозы, полученной от всех естественных источников.

Одна из главнейших проблем атомной энергетики — радиоактивные отходы. Это долгоживущая «мина»: радиоактивные вещества могут достигнуть биосферы спустя сотни тысяч и даже миллионы лет и всё ещё представлять для неё угрозу. Обсуждаются разные стратегии захоронения радиоактивных отходов: на дне океана, на необитаемых островах, в ледяных толщах Антарктиды или Гренландии, даже в космосе. Разные страны реализуют разные технологии в отношении отходов ядерных технологий. Предпочтение отдаётся строительству подземных хранилищ в стабильных геологических формациях (как правило, в скальных породах). Россия планирует начать строительство такого глубинного хранилища в Нижнеканском массиве скаль-

ных пород неподалёку от Енисея после 2030 года, а пока что там строится подземная исследовательская лаборатория на глубине 500 метров. В общем, проблема пока не решена.

## **АВАРИИ НА ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТАХ**

Сама по себе АЭС – это весьма чистое производство. Зато очень опасны аварии на любых ядерных объектах. За всё время существования таких объектов произошло около 400 аварий разной степени опасности, многие из них сопровождались утечкой радиоактивных веществ. Международная шкала ядерных событий выделяет семь уровней (категорий) опасности. Риск облучения населения возникает при уровнях, начиная с четвёртого. Вот перечень самых масштабных аварий, начиная с пятой категории.

1952 год, Канада – первая в мире радиационная авария пятой категории. Частичное расплавление ядерного реактора в Чок-Риверской лаборатории произошло из-за ошибок оператора и сбоя в системе аварийной остановки.

1957 год, СССР – «Кыштымская авария» шестой категории. Она оставалась самой масштабной ядерной аварией в мире до наступления Чернобыльской. Производственное объединение «Маяк», расположенное в закрытом городе Челябинск-40, производило компоненты для ядерного оружия, а также занималось переработкой радиоактивных отходов. В одной из ёмкостей для хранения высокоактивных отходов из-за выхода из строя системы охлаждения произошёл взрыв. В атмосферу были выброшены цезий-137 и стронций-90 (те самые изотопы, о которых мы говорили в связи с ядерными взрывами). На заражённой территории проживало около 270 тысяч человек.

1957 год, Великобритания – авария пятой категории на атомном реакторе в Уиндскейле. Из-за ошибок персонала произошёл пожар, и затем – крупный выброс радиоактивных веществ.

1979 год, США – авария пятой категории на АЭС в Тримайл-Айленд, связанная опять-таки с ошибками персонала. Работники АЭС заглушили реактор, но не учли, что энергия продолжает выделяться из-за распада радиоактивных продуктов деления, и этой энергии оказалось достаточно для расплавления оболочки реактора. Радиационные последствия для населения и окружающей среды были несущественными, однако именно эта авария стала началом широкого обще-

ственного движения протестов против атомной энергетики. После этой аварии вплоть до 2012 года никто в США не получал лицензии на возведение АЭС, не были запущены и десятки уже согласованных к тому моменту атомных станций.

1985 год, СССР – авария ядерной энергетической установки на атомной подводной лодке в бухте Чажма Японского моря (пятая категория), повлёкшая за собой гибель одиннадцати человек и облучение сотен людей.

1986 год, СССР – самая крупная в мировой истории радиационная катастрофа на Чернобыльской АЭС (Украина), седьмая категория. Авария произошла во время тренировочных учений по причине недостаточной компетентности персонала и несовершенства конструкции реактора. В результате взрыва сразу пострадали от радиации 134 человека, находившиеся на месте аварии. 28 пожарных скончались от лучевой болезни в первые три месяца, ещё 16 умерли в течение 18 лет от разных причин: пневмонии, лейкоза, инфаркта. После взрыва на большой территории (в основном Черниговской, Гомельской, Брянской областей) выпало много радиоактивного йода. Поступая в организм через кожу, дыхательные пути, пищу, он накапливался в клетках щитовидной железы. За короткий промежуток времени его дозы составили 300 мЗв и более. В связи с этим почти у 500 детей в скором времени развился рак щитовидной железы. В следующие 18 лет ещё у 30 тысяч детей были обнаружены изменения щитовидки, в том числе опухоли.

2011 год, Япония – авария седьмой категории на АЭС «Фукусима-1». Пожалуй, это единственная авария, в которой не замешан «человеческий фактор»: ошибки и оплошности людей. В данном случае виноваты природные факторы: землетрясение и вызванное им цунами. Только два человека из персонала станции получили потенциально опасные дозы 500 мЗв. Но рыбу в тех краях запрещено ловить до сих пор. По прогнозам, полная ликвидация последствий может занять до сорока лет.

**Британский совет по исследованиям окружающей среды (NERC) в 2007 году опубликовал результаты своего исследования по последствиям катастрофы в Чернобыле. Вывод сделан неожиданный: последствия этой аварии для населения намного менее серьёзны, чем принято считать.**

## **Разрушительный эффект чернойбыльской радиации сопоставим с воздействием загрязнения воздуха, курения и ожирения.**

### **ТЭС ИЛИ АЭС?**

До 1988 года мировая атомная энергетика набирала обороты. В 1988 году атомные электростанции произвели 17% от всей электроэнергии на земле. Но к 2018 году их доля в энергетике упала до 10,2%. В США и развитых европейских странах атомная энергетика постепенно сворачивается: старые АЭС закрывают, новые не строят. В Германии к 2022 году должна прекратить работу последняя из 21 построенных там АЭС. В России же доля электроэнергии, производимой на АЭС, продолжает медленно, но верно расти. В наше время она составляет около 19% всей электроэнергии и сопоставима с долей, производимой гидроэлектростанциями. Но основную часть (более 60%) электроэнергии в России по-прежнему производят тепловые электростанции (ТЭС), сжигающие ископаемое топливо.

Общемировое сокращение атомной энергетике – следствие всеобщего страха перед ядерными катастрофами. Но есть ли достойная альтернатива «мирному атому»?

Начнём с того, что все страны считают главной мировой проблемой глобальное потепление, а потеплению способствуют выбросы углекислого и других парниковых газов, основная часть которых связана с сжиганием угля и природного газа. Переход на биотопливо проблему не решит, ведь при сжигании пальмового и соевого масла, которые используют для получения энергии, углекислоты выделяется больше, чем от угля. Ветровые и солнечные станции вряд ли станут основными источниками электроэнергии из-за непостоянства и нерегулируемости световых и ветровых потоков, а также меньшей рентабельности. Но если довести долю атомной энергии в мире хотя бы до 50%, уровень парниковых газов в атмосфере сам начнёт снижаться.

Парниковые газы – не единственная проблема, связанная с ТЭС. При сгорании угля в атмосферу выбрасываются мельчайшие частицы сажи, которые из-за своих малых размеров не отсеиваются в дыхательных путях человека и попадают через лёгкие напрямую в кровь,

становясь центрами образования тромбов и приводя к инсультам и инфарктам. Кроме того, среди выбросов ТЭС есть токсичные элементы, среди которых: чрезвычайно опасные диоксид серы, оксиды азота, а также ртуть, свинец, кадмий и многое другое. А ещё вы удивитесь, но радиоактивность одного килограмма выбросов ТЭС в пятьдесят раз выше, чем одного килограмма выбросов АЭС. Это относится даже к современным ТЭС, оборудованным фильтрующими системами. Радиоактивность выбросов ТЭС связана с зольной пылью, содержащей множество радиоактивных изотопов. Облака, извергаемые трубами ТЭС, — источник дополнительного облучения людей, так же как печи и камины, сжигающие уголь.

По оценкам, ежегодная смертность от заболеваний, обусловленных дымом ТЭС, гораздо выше смертности от раковых заболеваний, связанных с утечками радиоактивных веществ на АЭС.

**Общее число преждевременных смертей от сжигания угля оценивают в 800 тысяч в год. В инцидентах и авариях неатомной энергетики за последние 30 лет погибло более 80 тысяч человек. Всех преждевременных смертей от инцидентов на АЭС за всю их историю — около четырёх тысяч.**

По сути, против АЭС — только общественное мнение в США и странах Европы. Опросы показывают, что в России три четверти населения относятся к атомной энергетике положительно. Именно в России, а также азиатских странах (Китае, Южной Корее) происходит развитие и совершенствование атомных технологий. Специалисты утверждают, что аварии типа Чернобыля и Фукусимы на реакторах нового поколения просто невозможны. Согласно расчётам, современные реакторы могут выдержать землетрясение магнитудой 9 и цунами высотой 14 метров.

Кстати, вернуться к строительству новых АЭС после столь долгого перерыва, скажем в США, будет так же сложно, как и к восстановлению космической лунной программы: ведь у специалистов на протяжении двух с лишним десятилетий не было опыта нового строительства в своей стране, в результате утеряны специалисты, навыки и технологии.

## КУРЕНИЕ

Не правда ли, неожиданный пункт в перечне источников техногенного облучения? Речь здесь пойдёт не о никотине и не о продуктах неполного сгорания табака, и не о том, что промышленный табак содержит тысячи вредных веществ, из которых 30 особо токсичны. Речь о радиоактивности сигаретного дыма. Вместе с этим дымом в лёгкие курильщика, а также окружающих его людей попадают радиоактивные изотопы радия-226, полония-210 и радиогенного свинца-210. Появление этих изотопов в табаке связано с применением на промышленных табачных плантациях удобрений с высоким содержанием фосфатов. Большинство разрабатываемых фосфатных месторождений содержит уран, присутствующий в довольно высокой концентрации, а значит, там присутствуют и все члены уранового семейства, включая радий, полоний и свинец. Сигаретные фильтры задерживают лишь малую часть радиоактивных металлов. О радиоактивности сигаретного дыма заговорили сравнительно недавно, после исследований, опубликованных американскими учёными в 2008 году.

Оценки эквивалентных доз, получаемых активными и пассивными курильщиками, имеют очень большой разброс: от скромных микрозивертов в год до доз, превышающих в несколько раз установленные для техногенных источников облучения пределы. Это зависит и от сорта табака, и от масштабов курения.

**Ежегодно в мире жертвами активного и пассивного курения становятся два-три человека из каждых 100 тысяч.**

**От последствий радиации, включая аварии на ядерных объектах, в год умирает 0,05 человека на каждые 100 тысяч.**

**У нас в 40–60 раз больше шансов погибнуть от табака, чем от радиации, не связанной с курением.**

## ДРУГИЕ ИСТОЧНИКИ ТЕХНОГЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Ещё один источник ионизирующего излучения, с которым мы периодически сталкиваемся, — рентгеновские сканеры (рентгенотелевизионное досмотровое оборудование проходного типа). Они установлены во многих международных аэропортах, на крупных железнодорожных вокзалах и стадионах, а также в музеях Кремля и некоторых

государственных учреждениях. В зависимости от типа сканера, доза за «процедуру» колеблется от 0,000035 мкЗв до 0,2–0,4 мкЗв. Для сравнения, средняя мощность дозы от естественного облучения составляет 0,22 мкЗв в час, а за перелёт Москва – Санкт-Петербург вы получите добавочные 3–5 мкЗв. Можно сделать вывод, что эпизодические проходы сквозь сканеры допустимы, но делать это на регулярной основе крайне нежелательно.

Сейчас в аэропортах Москвы рентгеновские сканеры уже заменили на менее вредные микроволновые. Мощность сигнала такого сканера во много раз ниже мощности сигнала мобильного телефона. Вы легко отличите рентгеновский сканер от микроволнового по внешнему виду: рентгеновский похож на две железные будки, между которыми встаёт человек, а микроволновый – это прозрачная кабинка с двумя вращающимися стенками (там установлены излучающие антенны).

Существует огромное количество общеупотребительных предметов, являющихся источником облучения. Кто-то ещё использует старые часы со светящимся циферблатом, которые дают годовую эквивалентную дозу, в четыре раза превышающую ту, что обусловлена утечками на АЭС. При изготовлении таких циферблатов использовали радий или торий. В современных светящихся устройствах (брелоках, часах, компасах, указателях входа-выхода и прочих) используют радиоактивный изотоп водорода – тритий. Этот изотоп заключён в прозрачную герметичную ёмкость, на внутреннюю поверхность которой нанесён тонкий слой люминофора. Электроны, испускаемые тритием при  $\beta$ -распаде, вызывают свечение люминофора. Из-за малой энергии эти электроны поглощаются стенками ёмкости и не представляют опасности. Опасны могут быть более дешёвые брелоки, в которых тритий заменён на другие радиоактивные изотопы. Недостаток светящихся устройств с тритием – потеря половины яркости в течение 12 лет.

Хотя в той или иной степени радиоактивны могут быть многие бытовые предметы, но доза, получаемая нами от таких предметов, составляет сотые доли процента от суммарной дозы облучения. Еще порядка 1% общей дозы мы можем получить с продуктами питания, выращенными с применением фосфатных удобрений или на заражённых территориях.

**Наполнитель для кошачьего туалета изготавливается из бентонитовой глины, которая содержит радиоактивные элементы уран и торий.**

## **Я ШАГАЮ ПО МОСКВЕ**

Москва – единственный в мире город, где функционируют десять ядерных реакторов, где почти две сотни организаций работают с радиоактивными источниками, где функционируют десятки опасных производств, использующих радиоактивные материалы. Зачастую эти опасные объекты не имеют даже санитарно-защитных зон.

Семь из десяти действующих атомных реакторов (это всё реакторы малой мощности для научных исследований) находятся на территории Российского научного центра «Курчатовский институт», и здесь же – самое большое в мире городское хранилище отходов отработанного ядерного топлива. Хранилище начало заполняться с середины 1940-х, когда в Институте шла работа по созданию первого в мире атомного реактора и первой советской атомной бомбы.

Есть и другие радиационные свалки прошлого века, когда отработанные радиоактивные материалы просто выбрасывали в овраги за городом. А потом эти места оказались в черте города. Самая большая, но не единственная такая свалка – вдоль Москвы-реки рядом с Каширским шоссе. Работа по вывозу радиоактивного грунта постепенно ведётся, но эта работа очень медленная и кропотливая, требующая к тому же больших финансовых вложений. А между тем радиоактивные изотопы вместе с грунтовыми водами могут попадать в Москву-реку.

Имеются также сотни мест незаконного размещения радиоактивных отходов и старого медицинского оборудования на территории Москвы и области, и отнюдь не все из них обнаружены и обезврежены. Контролем радиационной безопасности в Москве, как и на всей территории РФ, занимается Роспотребнадзор. Кроме того, в Москве много лет работает организация МосНПО «Радон» (МосРадон), задача которой – мониторинг радиационной обстановки, обнаружение радиоактивных объектов и их обезвреживание. Уже выявлены сотни и сотни таких объектов, вывезены тысячи кубометров заражённого грунта (с последующим захоронением). А сколько ещё осталось необ-

наруженного? Иногда локальные очаги радиоактивного заражения находят энтузиасты-любители, шагая по городу с дозиметром.

**Средний уровень радиационного фона по Москве невысок: 1 мЗв/год (0,11 мкЗв/ч). Это вдвое меньше общемирового среднего значения. Но если вы где-то зарегистрируете мощность дозы 0,6 мкЗв/ч и более, вы можете обращаться в Роспотребнадзор.**

В завершение этой части книги хочется ещё раз повторить: основными источниками радиации в жизни обычного человека по-прежнему остаются естественный радиационный фон (особенно радон в жилых помещениях) и медицинские обследования. И эти факторы мы в определённой мере способны контролировать. К счастью, радиационные аварии и ситуации, в которых мы подвергаемся воздействию неконтролируемых источников радиации, очень редки. К несчастью, такие ситуации периодически случаются, так что будьте бдительны.

ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ:  
ОТ АТОМА ДО КОСМОСА



## ОТ АВТОРА

Эта книга — для любознательных школьников, студентов и тех, кто не специализируется на физико-математических науках, но хочет больше знать о мире, в котором мы живем.

Вы сможете проследить историю развития самой фундаментальной из всех естественных наук — физики, начиная от ее истоков в Древней Греции и до сегодняшних поисков, открытий и надежд. Вы узнаете и о законах микромира, и об устройстве мегамира. И, хотя физика — наука математическая, автор расскажет о ее основных идеях и законах обычным языком, без помощи формул. А те немногие и несложные формулы, которые всё же включены в книгу, вынесены в отдельные вставки, не нарушающие общего хода изложения.

Современная физика — наука поистине необъятная, она включает в себя десятки разделов и сотни подразделов. Всю науку не знает ни один из физиков. В небольшой по объему книге невозможно рассказать про всё, но можно проследить «основную канву» развития физических идей.

Автор книги более тридцати лет преподает физику самым разным слушателям и, стремясь сделать изложение максимально доступным широкому кругу читателей, надеется, что книга удовлетворит любознательность одних, разбудит интерес у других и вызовет у всех чувство восхищения тем, как просто и вместе с тем сложно устроен наш мир.

*Алла Казанцева*



**ЧАСТЬ 1.  
КРАТКАЯ ИСТОРИЯ  
ФИЗИКИ**

## ГЛАВА 1. ДРЕВНЯЯ ГРЕЦИЯ: ТОРЖЕСТВО РАЗУМА

Современная наука родилась примерно 400 лет назад, причем первой сформировалась физика. За это время люди прошли по пути научного познания гораздо дальше, чем за предшествующие несколько тысяч лет. В истории физики было два переломных периода, две революции: в XVII веке и в начале XX века.

Наука, подобно дереву, имеет мощные корни, и тянутся они из Древней Греции. Именно там в VI–V веках до н. э. возникла наука как доказательный вид знания, отличающийся от мифологического мышления. Этот переломный момент в истории человечества называют «греческим чудом». Впервые в истории критерием истины стало доказательство, а не авторитет богов и даже не практика. Разрабатывались законы логического мышления. Люди осознали, что знания нужны не только для выживания, что они имеют самостоятельную ценность.

**Пифагор (VI век до н. э.) назвал Вселенную словом «космос», что значит «порядок». Он же первым стал называть себя «философом», то есть «любителем мудрости». Математика как наука со своей методологией также родилась в трудах Пифагора и его последователей.**

Удивительное дело: как только человеческий разум освободился от пут всевозможных догм, он породил множество интереснейших идей — буквально на голом месте, ведь до экспериментов, даже простейших, в Древней Греции ещё не додумались. Наблюдение плюс логика — вот формула истинного знания, согласно Аристотелю.

И одной из первых глобальных идей, возникших из чистого разума, стала мысль о единстве мира, которая «нитью Ариадны» прошла через всю дальнейшую историю науки, обретая на каждом витке ее развития новый смысл.

Древнегреческие философы пытались найти первооснову всего сущего, то есть понять всё мироздание как проявление чего-то единого. Предлагались разные варианты первоосновы. Так, Фалес Милетский мыслил ее как нечто непрерывное и изменчивое, принимающее разные формы, подобно воде, превращающейся то в пар, то в лед. Знаменита его метафо-

ра «всё есть вода» (около 600 года до н. э.). Идея непрерывной первоосновы материи продержалась в науке до начала XX века.

**Термин «физика» ввел Аристотель (IV век до н. э.), назвав так науку о природе (от греч. «фюзис» — природа). Правда, он понимал физику шире, чем принято сейчас, и относил к ней все естественнонаучные вопросы, включая биологию, зоологию, психологию. Такое понимание физики сохранялось до XVII века.**

Противоположную идею выдвинули Левкипп и Демокрит (V век до н. э.): всё сущее состоит из вечных, неизменных и неделимых частиц — атомов, разделенных пустотой. Всё многообразие мира они объясняли различными комбинациями разных сортов атомов. Древнегреческие «атомисты» предполагали к тому же конечную делимость пространства и времени, то есть существование минимально возможных пространственных и временных интервалов. В XX веке, с рождением квантовой физики, эта мысль возродилась в виде гипотезы о квантах длины и времени. Основная же идея атомизма — построение всего сущего из минимального набора одинаковых частиц, родившись 2,5 тыс. лет назад, никогда не умирала и дожила до наших дней. Правда, роль «самых первичных» частиц переходила от атомов к элементарным частицам, потом к кваркам и лептонам... Ученые по-прежнему стремятся выйти на уровень «самых первичных» частиц, о чем мы расскажем подробнее дальше.

**Архимеда (III век до н. э.) по праву можно назвать первым «настоящим» физиком, а также математиком и выдающимся инженером. Он не только наблюдал и рассуждал, но и ставил эксперименты! Именно Архимед совершил революционный переход от качественных рассуждений к строгим законам. И первым физическим законом стал «закон Архимеда». Архимед установил на опыте, что сила, выталкивающая погруженное в жидкость тело, не зависит от формы тела, а определяется его объемом. Жаль, что после гибели Архимеда при осаде Сиракуз римлянами экспериментальное направление развития науки не получило продолжения.**

Удивительно, но в современной физике противоположные концепции первоосновы мира — непрерывность и дискретность — слились в нечто невообразимо единое!

И ещё одно неопределимое наследие античности — это неискоренимая вера, что Вселенная создана и живет по определенным законам, которые люди способны «открыть» и понять своим разумом. Эта вера вдохновляла ученых на протяжении веков и движет нами до сих пор.

**В 240 году до н. э. друг Архимеда Эратосфен впервые измерил радиус Земли. Два тысячелетия все географы и астрономы пользовались его результатами. Только в конце XVIII века Земля была измерена более точно.**

*«Самое удивительное свойство нашего мира — это то, что мы познаем», — писал через две с лишним тысячи лет Эйнштейн.*

**Аристарх Самосский (III век до н. э.) впервые предложил гелиоцентрическую систему мира и попытался на основе астрономических наблюдений оценить расстояние до Луны и Солнца. С Луной у него получилось очень неплохо: расстояние равно 80 земных радиусов (правильный ответ — 60), а вот с Солнцем он сильно промахнулся.**

В III веке н. э., после захвата римлянами греческих городов, античная наука зачахла. Наступила почти тысячелетняя пауза в развитии знания.

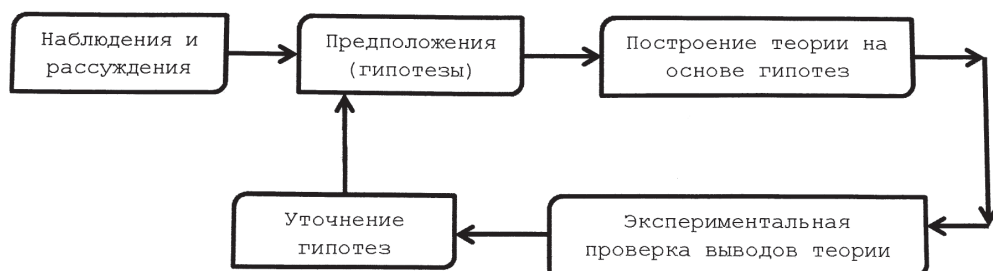
## **ГЛАВА 2. НАУЧНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ XVII ВЕКА: РОЖДЕНИЕ ФИЗИКИ**

Суть научной революции XVII века — это становление естественнонаучного эксперимента и формирование научного метода, которого ученые придерживаются и сегодня.

В это же время физика, которая в эпоху античности охватывала все знания о природе, выделилась в самостоятельную науку. Она обрела свой предмет исследований, метод и язык.

Физика изучает наиболее общие законы, лежащие в основе всех природных явлений, строение материи и законы ее движения. Таким образом, эта наука — фундамент всех естественных знаний. А научный метод, разработанный физиками (прежде всего Галилеем и Ньютоном), стал общим для всех естественных наук.

Новое и ключевое звено *научного метода* — это проверка выводов теории в специально поставленных экспериментах. Основные этапы научного метода можно представить в виде схемы:



Сначала ученые собирают и обобщают разнообразный экспериментальный материал. Но между экспериментальным материалом и теорией всегда лежит некоторая «пропасть», которую можно преодолеть только с помощью интуиции и воображения. Основные постулаты теории всегда *угадываются*, после чего из них выводятся следствия, проверяемые на опыте.

Именно благодаря научному методу научное знание является достоверным: проверенные на опыте законы не отменяются дальнейшими открытиями. Научные теории никогда не устаревают! Однако при расширении сферы опыта может обнаружиться ограниченность предыдущих знаний. Так произошло с законами классической физики, когда исследователи проникли на уровень микромира. Новая научная теория всегда «вбирает» в себя прежнюю, как фрагмент, четко очерчивая ее границы применимости. Каждая следующая — более точна и всеобъемлюща. Но это не значит, что старые теории больше не нужны — в своей сфере применимости они позволяют приходить к конкретным результатам проще и быстрее.

Чтобы физика смогла стать точной наукой, ей пришлось объединиться с математикой — стать *математической наукой*. И по мере своего развития физика становится всё более и более математизированной. Всё сложнее становится объяснять физические законы словами. Видимо, физику нельзя постичь ни на каком другом языке, кроме математического.

**«Чудесная загадка соответствия математического языка законам физики является удивительным даром, который мы не в состоянии понять и которого мы, возможно, недостойны».**  
**Е. Вигнер (американский физик, лауреат Нобелевской премии)**

## ГЛАВА 3. МЕГАМИР, МАКРОМИР, МИКРОМИР

С начала XX века стало отчетливо видно, что во Вселенной выделяются различные *уровни организации материи*. Объекты каждого из следующих по размерам уровней могут быть составлены из объектов предыдущего уровня. Мир в чем-то похож на конструктор: разбирая на элементы объект одного уровня, мы получаем объекты следующего уровня, которые, в свою очередь, состоят из ещё более мелких элементов. Так, все вещества состоят из молекул, а те — из атомов, атомы — из субатомных частиц, и так далее.

Возникает вопрос: бесконечна ли последовательность структурных уровней? Заканчивается ли процесс «дробления» объектов, или же он не будет иметь конца? Сегодня физика может с достаточно высокой долей вероятности ответить: число уровней организации материи конечно. Знает ли наука уже все эти уровни? Наверняка нет, но уже строятся некие теории.

Структурные уровни традиционно группируют, выделяя мегамир, макромир и микромир.

Объекты *мегамира* — это галактики, их скопления и сверхскопления, и вся видимая Вселенная — Метагалактика. Ее размер соответствует возрасту: примерно 13,8 миллиарда световых лет.

Масштабы доступного для современных наблюдений *микромифа* — от молекул  $10^9$ – $10^{10}$  (м) до расстояний порядка  $10^{20}$  м, что в миллионы раз меньше размера атомного ядра.

Между этими двумя уровнями — *макромир*, его масштабы — от пылинок до звезд. И только этот уровень дан нам в ощущениях.

Хотя законы природы едины в своей основе, но в каждом из миров — мега, макро и микро — доминируют те или иные фундаментальные взаимодействия между объектами и работают свои физические законы и теории. Так, мегамир — это царство гравитационного взаимодействия. Основное взаимодействие макромира (не считая гравитации) — электромагнитное. На уровне микромира действуют два специфических фундаментальных взаимодействия — сильное и слабое.

Возникновение и бытие Вселенной изучает ближайшая родственница физики — космология. Физика исследует законы макро- и микромира.

# ЧАСТЬ 2.

# ФИЗИКА МАКРОМИРА

*Мы начнем наше физическое путешествие с макромира – того единственного уровня, который мы способны воспринимать непосредственно. На этом уровне материя представлена телами, состоящими из неисчислимого количества частиц (атомов и молекул), и электромагнитными полями.*

*Физика макромира подразделяется на несколько разделов. Законы движения и взаимодействия тел изучает механика. Молекулярная физика и термодинамика сосредоточены на исследовании тепловых явлений, электродинамика – на изучении электромагнитных полей. Оптика – учение о свете и его взаимодействии с веществом. Все разделы в той или иной мере связаны друг с другом.*

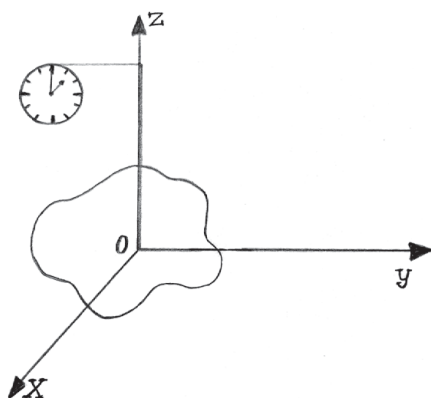
# ГЛАВА 1. КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

## СВОЙСТВА ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Как самоочевидные в классической механике и во всей классической физике принимаются аксиомы *абсолютности* пространства и времени. Это означает, что расстояния между телами и промежутки времени между событиями одинаковы во всех системах отсчета.

Пространство и время в классической физике считаются независимыми друг от друга. Пространство мыслится как «пустая сцена», на которую могут выходить «актеры» — частицы материи или поля. Наличие или отсутствие материи никак не меняет свойств пространства: оно считается трехмерным и плоским (евклидовым) — это значит, что для него справедливы аксиомы и теоремы геометрии Евклида.

Пространство предполагается *однородным* и *изотропным*, а время — *однородным*. Эти аксиомы лежат в основе не только классической, но и квантовой физики.



*Тело отсчета, связанная с ним система координат и часы образуют систему отсчета*

Первой фундаментальной теорией и краеугольным камнем всей физики макромира стала механика Ньютона, или классическая механика. А ее фундамент — законы Ньютона.

**Однородность времени означает равноправие всех моментов. Однородность пространства означает**

**одинаковость его свойств во всех точках, изотропность — равноправие всех направлений в пространстве.**

Прямая задача механики — объяснить движения тел. Это позволяют сделать три закона Ньютона при условии, что известны силы, с которыми взаимодействуют тела. Изучение же законов взаимодействия — задача не только механики, но и всех остальных разделов физики.

## **ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА**

В разных системах отсчета движение выглядит по-разному. Например, относительно Солнца планеты движутся по эллиптическим орбитам, а наблюдатель на Земле видит, что они описывают на небе сложные петли.

Не во всех системах отсчета движение объясняется одинаково просто. *Первый закон Ньютона*, по сути, дает критерий отбора «правильных» систем отсчета — их называют *инерциальными*. Чтобы выяснить, является ли выбранная система отсчета инерциальной, надо понаблюдать за телом, на которое не действуют никакие другие тела или же действия других тел скомпенсированы. Закон утверждает, что в инерциальной системе отсчета такое тело будет покоиться или двигаться равномерно прямолинейно. Так что принципиальной разницы между покоем и равномерным движением с точки зрения законов механики нет. Движение свободного от воздействий тела называют движением по инерции, а сам первый закон Ньютона — *законом инерции*.

**ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА (ЗАКОН ИНЕРЦИИ). Существуют такие системы отсчета, относительно которых всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока на него не действуют другие тела или же действия тел скомпенсированы.**

На первый взгляд этот закон кажется противоречащим обыденному опыту. Почему, например, катер без мотора не скользит по воде сколь угодно долго? Поразмыслив, понимаем: его тормозит сила трения со стороны воды. Если уменьшить трение, можно увеличить время скольжения.

С античных времен считалось очевидным, что для поддержания движения необходимо внешнее воздействие: нет силы — нет движения. Чтобы прийти к закону инерции, как и к любому другому фундаментальному закону физики, потребовались свобода мысли и богатое воображение. И проверить его напрямую на опыте невозможно: ведь отыскать тело, совершенно свободное от внешних воздействий, — недостижимая задача.

Законы Ньютона — это не три независимых утверждения, а взаимосвязанная система. Экспериментальной проверке поддается не каждый закон в отдельности, а все вместе.

## ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ

Инерциальные системы отсчета (ИСО) занимают особое положение в классической механике: ведь только в них выполняются законы Ньютона и все их следствия. Такая система должна быть привязана к свободному от внешних воздействий телу, но это недостижимый идеал. Для большинства практических задач «земного» масштаба система отсчета, связанная с Землей, служит хорошим приближением к ИСО. Для расчета движения космических кораблей и планет систему отсчета связывают с Солнцем, для задач ещё большего, галактического масштаба — с центром Галактики, и так далее.

Вам может показаться, что инерциальных систем отсчета мало, но это не так! Ведь с любым телом, движущимся равномерно прямолинейно относительно ИСО, можно связать новую систему отсчета, и она тоже будет инерциальной. Так что их бесконечно много, причем *все ИСО равноправны*. Это простое утверждение называют принципом относительности Галилея.

Равноправие инерциальных систем отсчета означает, что *все законы механики и описывающие их уравнения имеют один и тот же вид во всех ИСО*. Можно выразить ту же мысль иначе: *все механические явления протекают одинаково во всех ИСО при одинаковых начальных условиях*.

Проиллюстрируем последнее утверждение примером. Если бросить с мачты покоящегося относительно земли корабля камень, он упадет около основания мачты. А если корабль равномерно движется? Система отсчета, с ним связанная, также будет инерциальной, и камень, брошенный с мачты, должен упасть в то же место у ее основания. Такой исход эксперимента предсказал Галилей. Но современники не мог-

ли себе этого представить и нуждались в демонстрации. И в 1641 году, незадолго до смерти Галилея, его французский коллега в присутствии большого числа зрителей сбрасывал с мачты движущейся равномерно галеры камень, и тот всегда падал к ее подножию в одно и то же место независимо от скорости галеры, вызывая изумление зрителей.

## **СИЛЫ. МАССА. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА**

Не для поддержания, а для *изменения* движения тела требуется воздействие на него других тел. Воздействия характеризуются *силами*. Огромная часть физики посвящена изучению сил различной природы: гравитационных, электромагнитных и прочих.

Изменить движение — значит создать *ускорение*. Сила вызывает ускорение тела или его деформацию (что связано с различными ускорениями разных частей тела). Оба эти эффекта можно использовать для измерения сил. Например, простейший прибор для измерения силы — динамометр — использует эффект пропорциональности удлинения пружины приложенной силе. Можно сравнивать силы по ускорениям, сообщаемым разными силами одному и тому же телу: чем больше сила, тем больше ускорение.

Но ускорение зависит не только от силы, имеет значение ещё и свойство тел под названием *масса*. Так, вы легко сообщите ускорение игрушечному кораблику на воде, но почти не сдвинете с места большую лодку. Сравнивая ускорения, сообщаемые *равными* силами *разным* телам, мы одновременно сравниваем массы тел: чем больше масса тела, тем меньше ускорение, то есть тем меньше тело изменяет свое движение. Масса является количественной мерой инертных свойств тела.

Второй закон Ньютона постулирует связь силы, массы и ускорения.

**ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА (ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ).** Произведение массы тела  $m$  на его ускорение  $\vec{a}$  равно действующей силе  $\vec{F}$ :  $m\vec{a} = \vec{F}$ .

Если на тело действуют одновременно несколько сил, то ускорение будет таким, как если бы действовала одна результирующая сила, равная векторной сумме всех приложенных к телу сил. Это ещё один по-

студат классической механики, проверяемый на опыте (он называется принципом суперпозиции сил).

Второй закон Ньютона называют ещё законом движения. Он открывает нам принципиальную возможность полностью предсказать движение тела, если известны все действующие на него силы, а также информация о начальном состоянии тела: где оно находилось и с какой начальной скоростью двигалось. Важный нюанс: такой простой расчет возможен только в инерциальной системе отсчета.

### **ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА**

Ньютон первым высказал идею о том, что действие тел друг на друга *всегда* взаимно, поэтому мы говорим не просто о действии, а о *взаимодействии* тел. Например, когда вы прыгаете с лодки, она получает «отдачу»: лодка подтолкнула вас, а вы подтолкнули лодку.

**ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. Силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по величине и противоположны по направлению.**

Факт взаимности действия не всегда очевиден. Так, каждому ясно, что Земля притягивает яблоко, но разве очевидно, что и яблоко притягивает Землю, причем с такой же по величине силой? Может возникнуть недоумение: почему сила, действующая на яблоко, заставляет его падать, а такая же по величине сила, действующая на Землю, никак не влияет на ее движение? Ответ прост: масса Земли столь велика, что ускорение от «яблочной» силы исчезающе мало; яблоко же с его малой массой от такой же силы приобретает большое ускорение.

К формулировке третьего закона Ньютона можно ещё добавить: силы действия и противодействия всегда имеют одну и ту же природу. Что это значит?

### **О ПРИРОДЕ СИЛ**

При изучении механики мы встречаем много различных сил. Силы упругости возникают при деформации тел: растяжении пружины или натяжении нити; силы давления на опору и реакции опоры тоже относятся к этому классу сил. Силы трения скольжения появляются при движении тел друг относительно друга (санок по снегу), а силы тре-

ния покоя — при попытках вызвать такое движение (стронуть санки с места). Есть ещё вязкое трение (при движении в жидкости или газе), трение качения (при качении тел по твердой поверхности). Ну и, конечно, сила тяжести со стороны Земли, Солнца и других массивных тел.

Но, если копнуть глубже, оказывается, что все эти «механические» силы, кроме силы тяжести, имеют общую природу — электромагнитную. В конечном счете их причиной является взаимодействие молекул одного и того же или разных тел друг с другом. Так, при растяжении пружины молекулы разных ее сечений удаляются друг от друга, и из-за этого возникает их электрическое притяжение, которое и проявляется на макроскопическом уровне как сила упругости. Аналогично и с трением: конечная его причина — взаимодействие молекул тел, движущихся относительно друг друга. *Взаимодействие же молекул всегда имеет электромагнитную природу.*

Итак, все силы в механике, кроме силы тяжести, имеют электромагнитную природу. Природа же силы тяжести иная — *гравитационная.*

Электромагнитное и гравитационное взаимодействия — это так называемые *фундаментальные взаимодействия.* На сегодня нам известны всего четыре фундаментальных взаимодействия. Два из них — сильное и слабое — действуют только в масштабах микромира, и о них мы поговорим в следующей части книги.

Итак, чтобы предсказывать движение тел, надо знать всё обо всех возможных силах. Как же получать такие знания?

Изучение различных сил природы стало содержанием физики XVIII–XIX веков. Инструментом служил и служит всё тот же второй закон Ньютона. Наблюдая за движением какого-то тела или тел, по имеющемуся ускорению мы вычисляем результирующую силу. Если среди сил «спряталась» новая, доселе неизвестная, мы ее обнаружим и вычислим. Пример показал сам Ньютон, исследовав гравитационную силу и открыв закон всемирного тяготения.

**Книга «Математические начала натуральной философии» Исаака Ньютона в трех томах, изданная в 1687 году, содержит три закона Ньютона плюс закон всемирного тяготения, а также огромное число примеров применения этих законов для объяснения движений тел как на Земле, так и в космосе. Ньютон в «Началах» сформулировал программу развития**

**физики: «...по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления».**

## **ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА**

Ньютон, опираясь на данные астрономических наблюдений за движениями планет, смог определить зависимость сил взаимного притяжения двух небесных тел от их масс и расстояния между ними.

**ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА (1687):** сила притяжения двух тел прямо пропорциональна массам обоих тел ( $m_1$  и  $m_2$ ) и обратно пропорциональна квадрату расстояния ( $r$ ) между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} .$$

**Гравитационная постоянная  $G$  была экспериментально определена через 110 лет Генри Кавендишем.**

С помощью этого закона и трех законов Ньютона физики успешно и точнее образом рассчитывают движение космических кораблей, комет, планет, звезд и даже галактик.

*«Причину же этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю»,* — писал Ньютон. Спустя 230 лет, в 1917 году, голландский физик Пауль Эренфест выяснил, что закон «обратных квадратов» связан с трехмерностью нашего пространства.

Ньютон уклонился от каких-либо объяснений природы тяготения. До настоящего времени наилучшей теорией, объясняющей природу тяготения, является общая теория относительности Эйнштейна, созданная в 1915 году. Она связала тяготение с локальными искривлениями пространства-времени материальными телами. Закон же всемирного тяготения Ньютона может быть получен как частный случай уравнений общей теории относительности при относительно небольшой плотности материи. Так реализуется преемственность физических теорий. Ньютонские законы вызвали целую лавину открытий. Первый триумф наступил в 1758 году, уже после смерти Ньютона, когда вернулась комета Галлея в точном соответствии с расчетами. Столетие после смерти Ньютона стало временем бурного развития небес-

ной механики — науки, построенной на законах механики Ньютона и законе всемирного тяготения. «На кончике пера» были открыты Нептун и Плутон. Эти же законы позволяют и по сей день предсказывать и открывать новые тела Солнечной системы.

## **МЕХАНИЧЕСКИЙ ДЕТЕРМИНИЗМ**

Механика Ньютона, по сути, сводит описание всего сущего к описанию движения частиц, его составляющих. А движение частиц вычисляется по законам Ньютона. Если в некоторый момент известны положения и скорости абсолютно всех частиц материи, а также известны законы их взаимодействия, то с помощью законов Ньютона можно в принципе предсказать состояние мироздания в любой другой момент будущего или прошлого. Итак, рецепт абсолютного знания, согласно классической механике:

$$\text{начальное состояние} + \text{силы} + \text{законы Ньютона} = \\ = \text{вся эволюция системы}$$

Это и есть механический детерминизм, идею которого четко сформулировал в XVIII веке Пьер Симон Лаплас, которого называли «французским Ньютоном» за блестящие достижения в математике, астрономии и физике.

Конечно, сложность решения задачи о движении каждой частицы мироздания делает эту возможность чисто гипотетической. Но это не спасает нас от фатализма: даже если мы не можем точно рассчитать будущее состояние, оно всё равно предопределено начальным состоянием и действующими в природе законами. Получается, что наша свобода — всего лишь в неполном знании.

К счастью, квантовая физика, появившаяся в XX веке, совершенно иначе ответила на вопрос о детерминизме. Возможности классической механики ограничены рамками макромира — и это принципиально важно.

## **ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ**

Не всегда необходимо детально описывать движение всех частиц системы, чтобы получить ответы на некоторые вопросы о будущем состоянии системы — иногда тут могут помочь «законы сохранения».

В механике их установлено три: законы сохранения импульса, момента импульса и энергии.

Непосредственно наблюдаемые величины — положение всех частиц системы и их скорости — задают *состояние* системы. Для каждого состояния можно по определенным формулам вычислить его характеристики: импульс, момент импульса и механическую энергию. Эти характеристики системы весьма абстрактны — они не воспринимаются нами непосредственно, как, скажем, скорость или сила. Их полезность состоит в том, что при определенных условиях они не меняются с течением времени (сохраняются). Поэтому с их помощью можно получить некую (пусть и неполную) информацию о будущем, не рассматривая все детали происходящих процессов.

Начнем с *импульса*, который Ньютон называл «количеством движения». Интуитивно ясно, что тяжелое и легкое тела при равных скоростях обладают разным «количеством движения».

**Импульс тела — это произведение массы  $m$  тела на его скорость  $\vec{v}$ :  $\vec{p} = m\vec{v}$ . Импульс системы равен векторной сумме импульсов входящих в систему тел.**

Представим себе систему тел, которые взаимодействуют только друг с другом и не взаимодействуют с телами, не входящими в систему. Такая система называется *замкнутой*. Ньютон на основе второго и третьего законов установил, что **в замкнутой системе импульс сохраняется**, то есть не меняется со временем.

Представьте, что вы сидите в корзине воздушного шара, неподвижно парящего в воздухе. Система «шар — корзина» ведет себя как замкнутая, так как внешние силы (сила тяжести и «архимедова» сила) уравновешены. Если вы начнете карабкаться вверх по веревкам, привязывающим шар к корзине, шар с корзиной начнут опускаться — ведь полный импульс системы должен оставаться нулевым, каким он был изначально.

На законе сохранения импульса основан принцип реактивного движения: из сопла ракеты выбрасываются с большой скоростью продукты сгорания топлива, из-за чего сама ракета приобретает скорость в противоположном направлении.

Вторая физическая величина, всегда сохраняющаяся в замкнутой системе, — это *момент импульса*. Не давая строгого определения, мож-

но сказать, что момент импульса характеризует количество вращательного движения. Чем дальше от оси вращения находится частица, тем больший момент импульса она имеет, при равных скоростях и массах. (Вспомните: раскрутить камень на длинной веревке труднее, чем на короткой.)

**Момент импульса частицы массы  $m$ , вращающейся по окружности радиуса  $r$  со скоростью  $v$ , равен  $mvr$ . Момент импульса вращающегося тела равен сумме моментов импульса его частиц.**

Иллюстрацией закона сохранения момента импульса может служить фигуристка, совершающая вращение на льду. Она начинает вращение с раскинутыми в стороны руками, а когда прижимает их к телу, вращение становится быстрее: руки стали ближе к оси, и для сохранения момента импульса скорость вращения должна возрасти. Точно так же обычная звезда, сжимаясь до сверхплотного состояния нейтронной звезды, начинает вращаться вокруг своей оси намного быстрее.

В соответствии с законом сохранения момента импульса вершат свой вечный космический танец планеты Солнечной системы со своими спутниками и звезды в галактиках.

Наконец, третий и самый знаменитый закон сохранения — это закон сохранения энергии.

*Механическая энергия*  $E_{\text{мех}}$  есть сумма кинетической энергии, связанной с движением тел системы, и потенциальной энергии их взаимодействия:

$$E_{\text{мех}} = E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}}.$$

Формула кинетической энергии весьма проста. Что касается потенциальной энергии, то для каждого типа взаимодействия (упругого, гравитационного и т. д.) выводится своя формула.

**Кинетическая энергия частицы массы  $m$ , имеющей скорость  $v$ :**

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}.$$

**Кинетическая энергия тела или системы тел равна сумме кинетических энергий всех входящих в систему частиц. Потенциальную энергию взаимодействия (гравитационного притяжения) тела массы  $m$  с Землей можно рассчитать по формуле:  $E_{\text{пот}} = mgh$ , где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения,  $h$  — высота тела над поверхностью земли.**

Сохранение механической энергии при определенных условиях доказывается на основе законов Ньютона. В отличие от предыдущих двух законов сохранения, одной только замкнутости системы недостаточно. Если в замкнутой системе действуют силы трения, механическая энергия убывает, превращаясь частично или полностью в тепловую энергию. Так, например, разогревается космический аппарат или метеор, попадая в атмосферу Земли: из-за трения он постепенно теряет свою скорость, и механическая энергия системы «аппарат — Земля» уменьшается.

Итак, условие сохранения механической энергии в замкнутой системе — это отсутствие сил трения. (Единственный вид трения, не препятствующий сохранению механической энергии, — это трение покоя.)

**Если трение невелико, например, из-за малой скорости падения камня с небольшой высоты, то механическая энергия практически полностью сохраняется. До начала падения камня энергия была сосредоточена в потенциальной форме ( $E_{\text{мех}} = E_{\text{пот}} = mgh$ ). По мере нарастания скорости падения потенциальная энергия уменьшается, а кинетическая — увеличивается, так что их сумма остается постоянной. При достижении земной поверхности потенциальная энергия становится равной нулю, и вся энергия переходит в кинетическую форму ( $E_{\text{мех}} = E_{\text{кин}} = mv^2/2$ ). Приравняв начальную потенциальную энергию к конечной кинетической ( $mgh = mv^2/2$ ), мы легко можем найти скорость камня при ударе о землю, и это проще, чем рассчитывать скорость камня, применяя второй закон Ньютона.**

По мере развития физики эти три закона сохранения вышли из колыбели механики, распространились на все физические явления макро- и микромира и получили статус **универсальных принципов природы**. Понятия импульса и момента импульса были обобщены на случай электромагнитных и прочих полей. Энергия в современной физике стала общей количественной мерой движения и взаимодействия всех видов материи. Она может существовать в различных *формах*: механической, химической, тепловой, электрической, ядерной... Многие из этих форм на самом деле есть различные проявления одной и той же формы энергии на разных уровнях. Например, химическая энергия связана с электрическим взаимодействием атомов, тепловая — с кинетической энергией движения атомов и молекул.

*Энергия в общезначимом смысле никогда не исчезает и не создается, она может только переходить из одной формы в другую.*

Вера в законы сохранения импульса, момента импульса и энергии как в универсальные принципы природы ещё ни разу не подвела ученых. Так, к примеру, в микромире была открыта неуловимая частица нейтрино — по кажущемуся нарушению всех трех законов сохранения: импульса, момента импульса и энергии.

В XX веке обнаружилось ещё более глубокие смыслы этих законов. Оказалось, что они связаны с фундаментальными свойствами пространства и времени: изотропностью пространства и однородностью времени и пространства.

## **РАЗДЕЛЫ МЕХАНИКИ**

Законы Ньютона и вытекающие из них законы сохранения импульса, момента импульса и энергии — это фундамент, на котором строится вся механика. В свою очередь, законы Ньютона базируются на аксиомах о свойствах пространства и времени.

Можно представить себе классическую механику в виде дерева, стволом которого являются эти законы. От ствола растут многочисленные ветви — разные разделы механики, изучающие механические процессы в различных системах. На рисунке перечислены далеко не все разделы механики. И «дерево» это всё ещё в процессе роста.

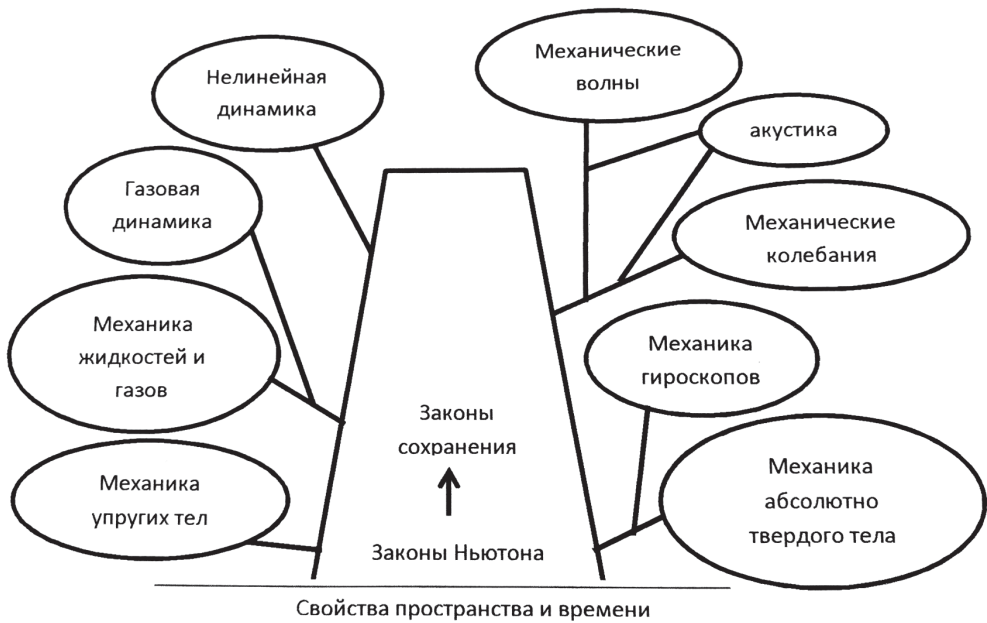


Рисунок 1. «Древо механики»

Механика, сформировавшись раньше всех остальных разделов классической физики, стала «поставщиком» универсальных методов изучения различных процессов природы. Так, разработанные в рамках механики методы изучения колебаний и распространения волн оказались удивительно эффективными при анализе самых разнообразных явлений не только в физике, но и в экономике, социологии, экологии.

## АКУСТИКА

Взглянем на одну из веточек «древа механики» (см. рис. 1) – на раздел, предмет изучения которого каждому из нас близок и понятен: на акустику. Что такое звук, как он возникает и распространяется, как воспринимается человеком? На эти вопросы отвечает акустика.

Чтобы мы могли слышать звук, должны присутствовать три фактора:

- 1) источник звука: колеблющееся тело;
- 2) упругая среда, передающая эти колебания и доносящая их до приемника;
- 3) приемник звука: ухо, микрофон.

Колеблющееся тело — это и струна, которую ушибнули, и воздух в органных трубах, и стол, по которому ударили кулаком...

Упругая среда — это и воздух, и вода, и любое твёрдое тело. Все они обладают общим свойством: если сместить частицы среды в одном месте, со стороны соседних участков возникают силы, стремящиеся вернуть смещённые участки в прежнее положение.

Колеблющееся в воздухе тело создаёт вокруг себя попеременные сжатия-разряжения воздуха, которые распространяются все дальше от источника, подобно кругам на воде. При этом сами массы воздуха не перемещаются: каждая частичка воздуха лишь колеблется туда-сюда и заставляет колебаться соседние частицы (рис. 2).

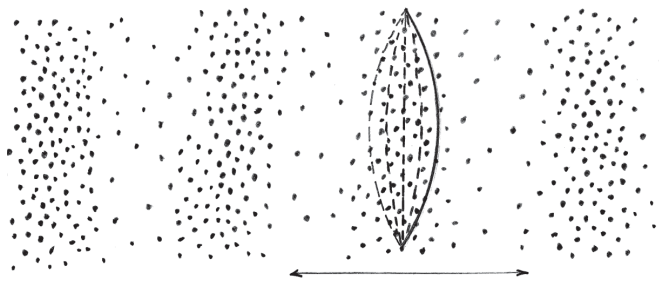


Рисунок 2. Колебания струны

Бегущая звуковая волна — это процесс распространения колебаний, создаваемых источником звука, в упругой среде. Нет среды — не будет слышно звука; к примеру, вы не услышите взрыва на Луне (разве что приложите ухо к лунной поверхности).

Достигая уха, звуковая волна вызывает колебания барабанной перепонки, которые запускают определённые физиологические процессы, и мы слышим звук.

Оговорка: частоты колебаний должны укладываться в звуковой диапазон от 16 до 20 000 колебаний в секунду, то есть герц (эти цифры относятся к молодым людям). По мере приближения к границам диапазона слышимости чувствительность уха ослабевает.

**С возрастом частотный диапазон слышимости сужается. Так, после 50 лет он обычно составляет от 30 до 12 000 герц. Колебания с частотой менее 16 герц создают инфразвук.**

**Инфразвуковые колебания с частотой 5–10 герц могут вызывать вибрацию внутренних органов и влиять на работу мозга. Они рожают чувство тревожности, усиливают ноющие боли в костях и суставах у больных людей. Источниками инфразвука являются автомобили, вагоны, гром от молнии, шум приближающегося шторма и т. д.**

Почему одни звуки мы воспринимаем как красивые, музыкальные, а другие — как шум? Разгадка кроется в физическом понятии *спектр колебаний*. Дело в том, что практически не бывает так, чтобы частицы тела колебались с одной определенной частотой, даже если это струна музыкального инструмента. Всегда возникает целый набор колебаний с разными частотами. Спектр показывает, как распределяется энергия колебаний по разным частотам.

Если все частоты кратны одной *основной частоте* (например, частоты 100, 200, 300, 400... герц кратны основной частоте 100 герц), то звук будет музыкальным. Основную частоту мы воспринимаем как высоту тона (к примеру, как нота до первой октавы). Кратные частоты называют *обертонами*.

Мы отличаем на слух ноту «до», взятую на рояле и на скрипке. Каким образом? У каждого музыкального инструмента свой неповторимый спектр обертонов, он-то и придает звуку окрас, то есть определяет *тембр звука*.

Если же в спектре звука присутствуют абсолютно все частоты некоторого диапазона (такой спектр называют непрерывным), то мы воспринимаем этот звук как шум. Тела сложной формы, если возбудить их колебания ударом, создают шум. А «простые» тела типа струн или воздушных столбов в органнх трубах рожают музыкальные звуки. Резонаторы музыкальных инструментов усиливают одни группы обертонов и ослабляют другие, создавая узнаваемый тембр звучания.

Опираясь на законы акустики, можно «подделать» звучание любого инструмента или голоса, открыть тайны волшебных певческих голосов, обеспечить идеальную акустику помещений и многое другое.

**«Шумовое загрязнение», характерное сейчас для больших городов, сокращает продолжительность жизни людей сильнее, чем курение. Научно доказано, что**

**музыка может укреплять иммунную систему, улучшать обмен веществ, повышать или понижать содержание гормонов в крови. В 2003 году Минздрав России признал музыкотерапию официальным методом лечения. Самым мощным и универсальным лекарством считается музыка Моцарта.**

## **ГЛАВА 2. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА**

Впервые с ограниченностью классических представлений о пространстве и времени столкнулись в конце XIX века при измерении скорости света, испускаемого движущимся источником. Эксперименты показали, что скорость света никак не зависит от скорости источника.

С точки зрения классической физики это необъяснимо.

Дело в том, что из абсолютности пространства и времени (то есть одинаковости расстояний и промежутков времени во всех системах отсчета) вытекает *классический закон сложений скоростей*. Для его иллюстрации представим, что имеется условно неподвижная система отсчета (например, связанная с землей) и движущаяся относительно нее система (например, поезд). Если вы идете по вагону поезда в сторону его движения, ваша скорость относительно земли будет суммой вашей собственной скорости и скорости поезда. (В общем случае надо складывать два *вектора* скоростей.)

А теперь представьте, что по ходу поезда распространяется световой луч. Так вот, его скорость относительно земли будет точно такая же, как и скорость относительно поезда! И в каком бы направлении ни распространялся свет, исходящий от движущегося источника, наблюдатели абсолютно во всех системах отсчета регистрируют одну и ту же его скорость (ее принято обозначать буквой  $c$ ):  **$c = 300$  тысяч километров в секунду.**

Рассуждая о таком «странном» поведении света, Альберт Эйнштейн в 1905 году пришел к выводу, что пространство и время не являются абсолютными: для наблюдателей в разных системах отсчета расстояния между телами и промежутки времени между событиями различны (то есть относительны). Новую теорию в дальнейшем назвали *теорией относительности*.

После появления в 1915 году общей теории относительности Эйнштейна теорию 1905 года стали называть частной (или специальной) теорией относительности. Название «частная» связано с тем, что эта теория применима только в инерциальных системах отсчета (ИСО), общая же теория относительности избавлена от этого ограничения.

## ОСНОВНЫЕ ПОСТУЛАТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В основе теории относительности Эйнштейна лежат два основных постулата.

*I. Принцип относительности Эйнштейна:* все законы физики и уравнения, их описывающие, одинаковы во всех инерциальных системах отсчета. (Этот постулат является обобщением принципа относительности Галилея на все физические явления и законы.)

*II. Инвариантность скорости света:* свет распространяется в вакууме с определенной скоростью  $c$ , не зависящей от движения источника и наблюдателя.

Посмотрим, как из постоянства (физики предпочитают термин «*инвариантность*») скорости света с неизбежностью вытекает относительность расстояний и времени.

## ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ВРЕМЕНИ И РАССТОЯНИЙ

В классической механике одновременность двух событий является абсолютной, т. е. не зависящей от выбора системы отсчета. Однако инвариантность скорости света делает это понятие относительным, зависящим от выбора ИСО. Эйнштейн показал это на простом мысленном опыте.

Пусть система отсчета  $K'$  (вагон) движется со скоростью  $V$  относительно инерциальной системы отсчета  $K$  (платформы). В середине вагона стоит наблюдатель 1, а над ним висит лампа. На платформе стоит наблюдатель 2. Когда середина вагона сравнялась с неподвижным наблюдателем, произошла вспышка лампы. Вопрос: достигнет ли свет концов А и Б вагона одновременно? (рис. 3.)

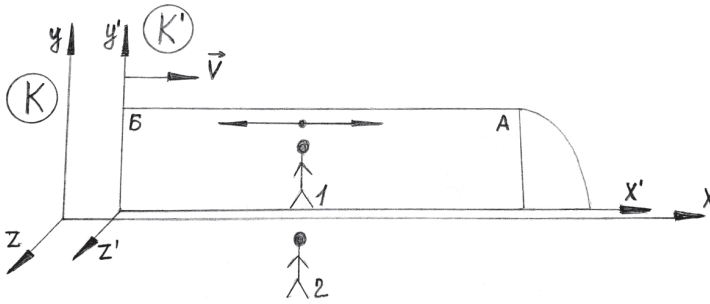


Рисунок 3

Наблюдатель 1 в вагоне скажет: да, свет достигает концов одновременно, так как пути лучей равны и скорости их равны.

Наблюдатель 2 на платформе скажет: заднего конца вагона (Б) свет достигнет раньше. В самом деле, скорость света в обоих направлениях одна и та же (согласно постулату II), но задняя стенка движется навстречу световому лучу, а передняя — убегает от него, так что свет проходит до задней стенки меньшее расстояние, чем до передней, и достигает стенки Б раньше.

Итак, *одновременность событий, происходящих в разных точках пространства, является понятием относительным, зависящим от выбора ИСО.*

Промежутки времени между событиями, измеренные наблюдателями в разных ИСО, не совпадают. И расстояния между точками, в которых произошли события, в различных ИСО тоже различаются.

Расчеты показывают: **в той системе отсчета, относительно которой часы покоятся, они идут быстрее всего.** Время, измеряемое неподвижными часами, называется *собственным временем*. Ход всех движущихся часов замедляется.

Так, с точки зрения наблюдателя на платформе, ход часов в вагоне *замедлился* (по сравнению с такими же часами на платформе).

Ваши наручные часы измеряют ваше собственное время. Увы, они идут быстрее любых других часов, движущихся относительно вас *равномерно*, т. е. собственное время самое короткое. Этот вывод справедлив, если вы движетесь равномерно, т. е. с вами можно связать ИСО. (Вообще, все выводы специальной теории относительности касаются только *инерциальных СО.*) «Сами для себя» мы растем и стареем бы-

стрее, чем для наблюдателей, пролетающих мимо нас. Но, чтобы этот эффект был заметен, скорости должны приближаться к скорости света. Даже скоростей современных ракет недостаточно, чтобы получить сколько-нибудь заметную разницу во времени.

**Все релятивистские (от лат. *relativus* — относительный) эффекты, возникающие при движении тела со скоростью  $V$ , определяются величиной «релятивистского корня».**

$$\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}.$$

**К примеру, скорость современной ракеты не превышает  $V = 30$  км/с, что в 10 тысяч раз меньше скорости света  $c$ . Значение релятивистского корня для такой ракеты практически не отличается от единицы и равно 0,999999995. Когда на Земле проходит год, на ракете проходит примерно на 0,1 секунды меньше.**

Интересно, что эффект замедления времени является *взаимным*: нам на Земле кажется, что наши часы идут быстрее, чем часы на ракете, а космонавтам в ракете — наоборот. Ведь все ИСО равноправны! Эффект «замедления времени при движении» не связан с изменением свойств часов и других тел из-за их движения. Это следствие инвариантности скорости света.

Остановимся на знаменитом «парадоксе близнецов». Близнец 1 отправляется в полет на ракете с околосветовой скоростью к другой звезде и обратно, близнец 2 остается на Земле. С точки зрения близнеца-землянина, течение времени на ракете замедлилось, значит, рассуждает он, близнец-космонавт меньше постареет за время полета. С точки зрения близнеца-космонавта, медленнее стареет земной близнец, потому что он движется относительно ракеты с такой же скоростью в обратном направлении. Так который же из близнецов окажется более молодым при возвращении?

Ответ: близнец-космонавт. Делать выводы о замедлении времени движущегося тела имеет право только тот, кто **всё время** находился в ИСО, т. е. близнец-землянин. Чтобы близнец-космонавт мог разобраться с ходом своего и чужого времени в тот период, когда он дви-

гался с ускорением, он должен прибегнуть к *общей* теории относительности (теории тяготения Эйнштейна). В период движения с ускорением он не может опираться на выводы специальной теории относительности! Общая же теория относительности говорит, что при движении с ускорением (а также вблизи сверхплотных тел — таких как черные дыры) время замедляется *абсолютно* — и это уже не взаимный эффект, а «односторонний». Именно во время движения ракеты с ускорением набегают абсолютная разница в возрасте близнецов.

С эффектом замедления времени при движении тесно связан эффект *сокращения длины в направлении движения*.

**Световой год — это расстояние, которое луч света проходит за один год. В космосе большие расстояния измеряют в световых годах.**

Рассмотрим этот эффект на примере. Пусть ракета летит от Земли к звезде S, расстояние до которой 50 световых лет, с такой большой скоростью, что время в ракете замедляется в 50 раз по сравнению с земным (расчеты показывают, что для этого скорость ракеты  $V$  должна составлять 0,9998 от скорости света  $c$ ). По земным часам ракета достигнет звезды через 50 лет, а по собственному времени космонавтов — через один год. По земным меркам ракета пролетела 50 световых лет. Космонавты же рассуждают так: Земля удаляется от нас со скоростью, почти равной  $c$ . Значит, за один год, пока мы летели к звезде S, Земля удалилась от нас на один световой год. Таким образом, для космонавтов длина маршрута сократилась в 50 раз.

Эффект сокращения длины в направлении движения тоже *взаимный*. Так, если две ракеты пролетают мимо друг друга, то каждая из них кажется наблюдателю в другой ракете укороченной.

*Собственная длина* предмета измеряется в той системе отсчета, относительно которой предмет покоится. В той ИСО, относительно которой предмет движется, его длина в направлении движения уменьшается.

## ИНТЕРВАЛ

Итак, в теории относительности пространство и время потеряли свою абсолютность. Но это не значит, что в новой теории нет ничего абсолютного (кроме скорости света), т. е. не меняющегося при пере-

ходе от одной ИСО к другой. Одной из таких инвариантных величин стал так называемый *интервал*  $s$ . Это величина, связывающая определенным образом промежуток времени  $\Delta t$  между двумя событиями и расстояние  $l$  между точками пространства, в которых они произошли.

**По определению, квадрат интервала между событиями 1 и 2 равен:**

$$s^2 = (c\Delta t)^2 - l^2.$$

**Интервал одинаков во всех ИСО.** Его значение связывает в некий «узел» расстояния и промежутки времени между событиями. *Пространство само по себе и время само по себе перестают быть самостоятельными и независимыми друг от друга.* Можно говорить о едином пространстве-времени.

По тому, положительна или отрицательна величина  $s^2$  для двух событий, можно сказать кое-что однозначно определенное про них.

Так, если  $s^2 > 0$ , т. е.  $c\Delta t > l$ , то можно найти такую систему отсчета, в которой эти события происходят в одной точке пространства ( $l = 0$ ), но обязательно в разные моменты ( $\Delta t \neq 0$ ). Такие интервалы называют *временеподобными*. Так как квадрат такого интервала положительный, сам временеподобный интервал  $s$  является вещественным. При временеподобном интервале порядок событий 1 и 2 один и тот же во всех ИСО. Временеподобный интервал между событиями означает, что они могут быть причинно связаны. Если события 1 и 2 происходят с одним и тем же телом, то интервал между ними всегда временеподобный: ведь путь  $l$ , который проходит тело за время  $\Delta t$ , всегда меньше пути  $c\Delta t$ , проходимого за то же время светом.

Если  $s^2 < 0$ , т. е.  $c\Delta t < l$ , интервал называют *пространственноподобным*. В этом случае можно найти такую систему отсчета, в которой эти события происходят одновременно ( $\Delta t = 0$ ), но обязательно в разных точках пространства ( $l \neq 0$ ). Так как  $s^2 < 0$ , сам пространственноподобный интервал  $s$  является мнимым. При таком интервале порядок событий 1 и 2 может отличаться в разных ИСО. Но в любой ИСО эти события происходят в разных точках пространства (в частности, они не могут произойти с одним и тем же телом). Пространственноподоб-

ный интервал между событиями означает, что они не могут быть причинно связаны.

Наконец, если  $s^2 = 0$ , интервал называют *светоподобным*. Он связывает события, происходящие с одним и тем же световым сигналом.

Разделение интервалов на времениподобные, пространственноподобные и светоподобные является абсолютным, т. е. не зависящим от выбора ИСО.

## **АБСОЛЮТНОЕ БУДУЩЕЕ, АБСОЛЮТНОЕ ПРОШЛОЕ, АБСОЛЮТНО УДАЛЕННЫЕ СОБЫТИЯ**

Возьмем произвольное событие  $O$ .

Для всех событий, разделенных с ним времениподобным интервалом, порядок событий будет одинаков во всех ИСО. Если в одной из систем отсчета некое событие  $B$  произошло после события  $O$ , то это же будет наблюдаться во всех других ИСО. Такого рода события принадлежат *абсолютному будущему* по отношению к событию  $O$ . Если в одной из систем отсчета некое событие  $P$  произошло раньше события  $O$ , то это же будет наблюдаться во всех других ИСО. Такого рода события принадлежат *абсолютному прошлому*.

Все события, разделенные с событием  $O$  пространственноподобным интервалом, — это *абсолютно удаленные события* от события  $O$ . Раньше или позже произошло такого рода событие, сказать определенно нельзя, но оно точно произошло в другой точке пространства, нежели событие  $O$ .

Вся теория относительности Эйнштейна базируется на этих представлениях о пространстве-времени. На их основе построены релятивистская механика и релятивистская электродинамика.

## **РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ**

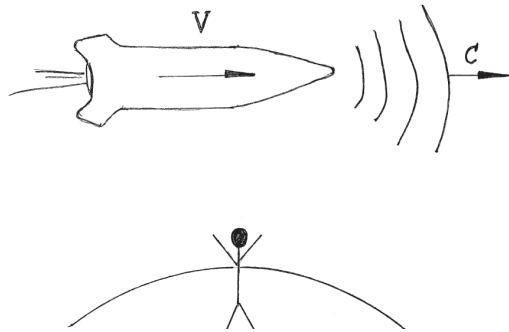
В релятивистской механике на смену привычной классической формуле сложения скоростей приходит новая формула, по которой никакая скорость ни в какой системе отсчета не может превысить скорость света  $c$ , а скорость света всегда оказывается одинаковой.

Вообще **скорость света играет в теории относительности роль предельно допустимой** для распространения вещества, информации и взаимодействий. Эта скорость никогда не может быть в точности достигнута ни одним телом, имеющим ненулевую массу.

Продemonстрируем релятивистскую формулу сложения скоростей на примере. Пусть из ракеты, движущейся относительно Земли со скоростью  $V$ , выпускают вперед по ходу движения световой сигнал. В классической механике мы бы пришли к выводу, что скорость  $v$  этого сигнала относительно Земли равна. Релятивистская же формула будет иметь в этом случае вид:  $V = c + V > c$

$$v = \frac{c + V}{1 + \frac{cV}{c^2}} = \frac{c(c + V)}{c + V} = c.$$

Так что релятивистская формула сложения скоростей никогда «не позволит» нарушить постулат об инвариантности скорости света.



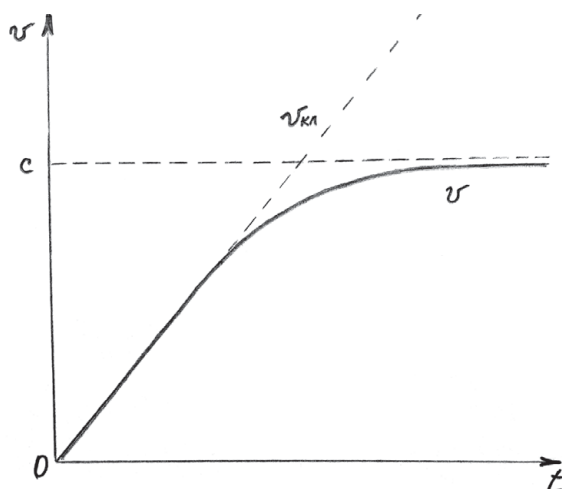
Формулы теории относительности допускают существование частиц с нулевой массой при условии, что эти частицы движутся со скоростью света. Движение со скоростью света — единственное состояние, в котором такие частицы могут существовать. Примером такого рода объектов является *фотон* — неделимая порция световой энергии.

## РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ

При движении с околосветовыми скоростями второй закон Ньютона перестает работать. В самом деле, представим, что на тело действует постоянная сила в течение долгого времени. По закону Ньютона тело будет все время двигаться с постоянным ускорением, то есть его скорость каждую секунду будет увеличиваться на одну и ту же величину — и так до бесконечности. Релятивистский же закон движения «устроен» так, что по мере приближения скорости тела к скорости

света ускорение постепенно уменьшается (инертность тела растёт), так что скорость будет стремиться к скорости света, никогда ее не достигая. Даже если мы будем всё время увеличивать силу, скорость тела не сможет достичь скорости света  $c$ .

На графике показана зависимость скорости  $v$  тела от времени при постоянно действующей силе в классической механике (пунктирная прямая  $v_{кл}$  на графике) и в теории относительности (сплошная кривая  $v$ ). Из сравнения этих двух линий — предсказаний классической механики и релятивистской механики — видно, что при малых скоростях предсказания этих теорий совпадают.



Закон сохранения импульса в теории относительности был принят как постулат — фундаментальный закон природы, и это привело к уточнению понятия импульса тела. Формула для расчета кинетической энергии тоже изменилась.

**Из требования сохранения импульса замкнутой системы вытекает следующее определение импульса частицы массы  $m$ , движущейся со скоростью  $\vec{v}$ :**

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

**Опыт подтверждает, что так введенный импульс действительно сохраняется в замкнутых системах. Если скорость частицы гораздо меньше скорости света  $c$ , эта формула переходит в классическое определение импульса.**

Хотя практически все формулы механики в теории относительности стали иными, при малых по сравнению со скоростью света скоростях они переходят в формулы классической механики. **Релятивистская механика включает в себя классическую механику как более простой частный случай.**

## **ЭНЕРГИЯ ПОКОЯ**

Наверное, самое важное для дальнейшей истории открытие Эйнштейна — это энергия покоя.

В классической физике понятие энергии связывалось с разными формами движения и взаимодействия частиц. Из формул же релятивистской механики следует, что даже у свободной покоящейся частицы имеется «энергия покоя»  $E_0 = mc^2$ . Как любая энергия, энергия покоя может частично или полностью быть преобразована в другие виды энергии.

Энергия покоя  $mc^2$  очень велика. Так, тело массой 1 кг обладает энергией покоя  $9 \cdot 10^{16}$  Дж. Такую энергию самая большая в России Саьяно-Шушенская ГЭС вырабатывает за полгода. Однако эта огромная энергия чрезвычайно «труднодоступна». Если бы мы могли легко и просто «отщипывать» от энергии покоя тел, у нас не было бы проблем с обеспечением энергией.

**Имя Эйнштейна, словно новая звезда, засияло на физическом небосклоне в 1905 году, когда этот никому не известный 26-летний работник бернского патентного бюро опубликовал сразу четыре революционные работы по теоретической физике. За первую из них он позднее был удостоен Нобелевской премии — это было объяснение законов фотоэффекта на основе квантовой гипотезы о свете. Вторая работа, посвященная теории броуновского движения, привела в итоге к окончательному признанию существования молекул.**

**В третьей работе излагались основы специальной теории относительности, а в четвертой была открыта энергия покоя.**

Способ высвобождения части энергии покоя для практического применения был найден в ядерной физике. Энергия, высвобождаемая в атомных реакторах, — это и есть небольшая доля энергии покоя ядер. В ядерном реакторе используется всего около 0,1% энергии покоя ядер — но и это в миллионы и миллиарды раз больше энергии любых химических реакций (при той же массе топлива).

Почти 100%-ное превращение энергии покоя в электромагнитную энергию происходит лишь при аннигиляции вещества и антивещества (см. след. часть книги), но для практического применения этот способ не годится, так как у нас нет готового антивещества, а на его синтез мы бы затратили энергии больше, чем получили при аннигиляции.

В релятивистской механике масса  $m$  приобрела новый физический смысл. В классической механике масса — мера инертности тела. В релятивистской физике масса  $m$  — *мера внутренней энергии тела (энергии покоя)*. Когда говорят об эквивалентности массы и энергии, имеют в виду, что изменение энергии покоя приводит к изменению массы, и наоборот. Так, Солнце излучает свет за счет своей энергии покоя, ежесекундно теряя при этом более четырех миллионов тонн своей массы.

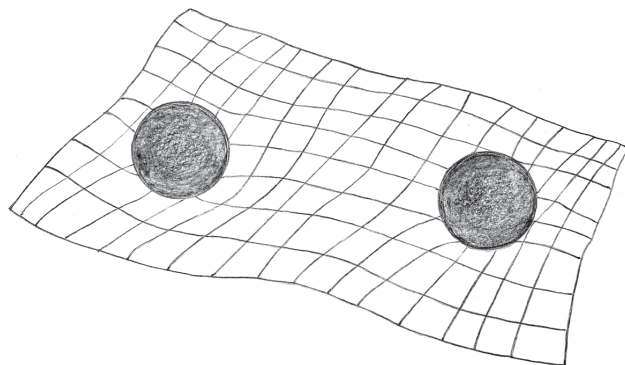
## **ЗНАЧЕНИЕ ТЕОРИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

Теории относительности Эйнштейна — специальная и общая — показали, что механика Ньютона и закон всемирного тяготения, несмотря на свое могущество, имеют границы применимости. Эти две теории радикально изменили наши представления о пространстве и времени, казавшиеся очевидными на протяжении тысяч лет. Они лишили пространство и время статуса абсолютных и существующих независимо друг от друга.

Но специальная теория относительности всё ещё рассматривала пространство-время независимо от материи — оно как бы оставалось «статичной ареной» для событий, происходящих с материальными телами. Общая теория относительности сделала следующий шаг: про-

пространство-время не только зависит от движения наблюдателя, оно также может изменяться в ответ на присутствие материи.

Проще говоря, любое массивное тело искривляет пространство вокруг себя – подобно тому, как вы искривляете поверхность батута, на котором стоите. Если на краю этой «ямки» поместить другое тело, оно будет скатываться в «ямку» – притягиваться (см. рис. 4). Таким образом, искривленное пространство-время – это и есть тяготение. Так Эйнштейн объяснил природу тяготения и причину его вседесущности. К тому же в местах сильного искривления пространства ход времени замедляется, и это замедление носит абсолютный характер.



*Рисунок 4. Искривление телом пространства вокруг себя*

Таким образом, пространство-время, неразрывно связанное с материей, стало принимать непосредственное участие в событиях.

Новые представления о пространстве-времени привели в итоге к пониманию того, что Вселенная не остается неизменной, она эволюционирует – из общей теории относительности родилась современная космология (см. часть 4 книги).

Но важно ещё и то, что все эти удивительные открытия наглядно продемонстрировали «вечную ценность» законов классической механики, которые в границах своей применимости позволяют быстрее и проще получать те же результаты, что и более общие релятивистские теории. Знание, полученное на основе научного метода, никогда не теряет своей ценности.

**«Пусть никто не думает, что великое создание Ньютона может быть ниспровергнуто теорией относительности или какой-нибудь другой теорией. Ясные и широкие идеи Ньютона навечно сохраняют свое значение фундамента, на котором построены наши современные физические представления». Альберт Эйнштейн.**

## **ГЛАВА 3. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ**

Окружающий нас мир — это мир тел и веществ в разных агрегатных состояниях. С этими телами и веществами происходят различные тепловые явления и процессы, связанные с изменением температуры и агрегатных состояний.

В физике параллельно формировались два подхода к изучению тепловых явлений: термодинамика и молекулярно-кинетическая теория.

Термодинамика ставила своей целью установить на основе опыта самые общие законы тепловых процессов, которым подчиняются все тела и вещества, независимо от деталей их строения.

Сторонники атомистической гипотезы рассматривали тела — твердые, жидкие, газообразные — как состоящие из частиц (атомов и молекул), находящихся в непрерывном тепловом движении. Применяя к этим частицам законы классической механики, они строили модели строения систем (например, модель идеального газа, кристаллов и пр.) и пытались объяснить с их помощью закономерности тепловых процессов.

Эти два подхода — термодинамика и молекулярно-кинетическая теория (*от греч. kinetikos — «связанный с движением»*) — дополняют друг друга. Но в истории физики их старались разделять по той простой причине, что само существование молекул очень долгое время подвергалось сомнению.

### **ДРАМАТИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ АТОМИЗМА**

Удивительна судьба атомистической гипотезы! Представление о неделимых атомах возникло у Демокрита (460–371 годы до н. э.). Но вскоре после его смерти гипотеза была отвергнута благодаря авторитету Аристотеля, который полагал, что первооснову мира составляет

непрерывная материя. Впоследствии католическая церковь превратила учение Аристотеля в догму, противников же вынуждала к отречению от своих взглядов, а труды их сжигала. Лишь в XIII–XIV веках вновь появились отдельные сторонники атомизма, но они преследовались церковью. Французский парламент в начале XVII века запрещал распространение учения об атомах под страхом смертной казни! И все же атомистическую гипотезу поддерживали многие ученые XVII века и начала XVIII (Фрэнсис Бэкон, Декарт, Ньютон и другие). Даниил Бернулли в 1738 году совершенно верно объяснил давление газов движением молекул.

В XVIII веке многие ученые отвернулись от атомизма, но, наперекор общему мнению, учение о мельчайших частицах вещества развивал Михаил Ломоносов, а французский химик Лавуазье (1743–1794), погибший на гильотине во время французской революции, впервые разделил все вещества на химические элементы (атомы) и химические соединения (молекулы).

В начале XIX века большой шаг вперед сделал английский химик и физик Джон Дальтон. Он впервые сравнил массы атомов друг с другом, определив, при каких весовых отношениях их химическая реакция протекает без остатка. Он также придумал символы для обозначения атомов различных химических элементов и составил таблицу относительных атомных масс — она вышла в свет в 1803 году. Так впервые человек смог измерить невидимое. Но подчеркнем, что определить удалось лишь относительные массы атомов — до их реального «взвешивания» было ещё очень далеко.

Идеи атомизма ещё очень долго не были общепризнанными в учебном мире — до самого начала XX века, до 1912 года!

**В одном из учебников 1885 года написано: «Твердый атом живет в виде невероятной, но все ещё не опровергнутой гипотезы и поднесь... Однако несравненно правдоподобнее теория, по которой материя непрерывна». Противники атомизма говорили, что атомная гипотеза является примитивной тенденцией видеть за всеми явлениями природы механическую модель.**

Очень важную роль в судьбе атомизма сыграло незаметное на первый взгляд открытие английского ботаника Роберта Брауна (или Бро-

уна), сделанное в 1827 году. Наблюдая в микроскоп взвесь цветочной пыльцы в воде, он обнаружил беспорядочное непрерывное движение частиц взвеси. Лишь полвека спустя было высказано предположение, что это движение вызвано ударами молекул воды.

Первая количественная теория броуновского движения на основе молекулярной гипотезы была создана Эйнштейном в 1905 году (и это было первое появление его имени на арене большой науки). Но опыты по проверке этой теории требовали настолько большой точности, что сам ученый сомневался в их осуществимости. И всё же такие эксперименты провел французский физик Жан Батист Перрен в 1908–1913 годах. Полученные им результаты столь хорошо согласовались с предсказаниями теории Эйнштейна, что были признаны как решающее подтверждение существования молекул. «Патриарх» физики Лоренц говорил в лекции 1912 года, что реальность молекул стала фактом, почти что наблюдаемым непосредственно.

В этих же опытах Перрена впервые удалось «сосчитать» молекулы — измерить число Авогадро, благодаря чему появилась возможность вычислить их массы. Наконец-то стало ясно, насколько они малы.

**Число Авогадро — количество атомов или молекул в одном моле вещества. Для воды 1 моль — это 18 граммов. Число Авогадро равно  $6 \times 10^{23}$  (23 нуля после цифры 6). Три символа огромных чисел: число звезд во всей видимой Вселенной, число песчинок на всех пляжах Земли и число молекул в стакане воды. Чего же больше? Оказалось, молекул воды в стакане больше. На втором месте — звезды.**

Между прочим, к этому времени уже был открыт периодический закон Менделеева (1869), закон радиоактивного распада атомов (1903), то есть нарушение постулата об их неделимости, а Резерфорд в 1911 году уже завершил свои знаменитые опыты, сделав в итоге вывод о существовании атомного ядра. Наглядный пример того, что наука не развивается поступательно, шаг за шагом. Революционные идеи вызревают в недрах старой научной парадигмы и в конце концов ломают ее.

**Размеры атомов — десятые доли нанометра. Разрешение лучших электронных микроскопов достигает нескольких сотых долей нанометра. На современных электронных фотографиях можно видеть отдельные атомы кристаллических решеток.**

Эта история весьма поучительна. С одной стороны, поражает консервативность научной элиты — физики не торопятся признавать новые открытия, пока нет 100%-ной уверенности в подтверждении их на опыте. Зато оборотная сторона этого упрямства — гарантия научной обоснованности и вечная ценность физических теорий.

## **ЧТО ТАКОЕ ТЕПЛОТА И ТЕМПЕРАТУРА?**

Если механика в XVIII столетии была уже зрелой наукой, то наука о теплоте начала делать только первые шаги.

Ещё в древности из повседневного опыта родился образ теплоты как некой субстанции, «жидкости», перетекающей от горячего тела к холодному (эту мифическую жидкость позднее назвали теплородом). Основателем такого представления о теплоте считают Платона (V–IV века до н. э.). Образ теплоты как жидкости сохранился в нашей лексике: мы говорим, что тепло разливается по телу.

Древнегреческие атомисты Левкипп и Демокрит (V век до н. э.) связывали теплоту с движением атомов.

Эти две конкурирующие гипотезы о теплоте сосуществовали на протяжении веков вплоть до начала XX века. «Пальма первенства» перешла от одной к другой и обратно.

В XVII и первой половине XVIII века очень перспективной представлялась идея о связи теплоты с движением малых частиц материи — это вселяло надежду обосновать тепловые явления законами ньютоновской механики. Первый большой успех на этом пути — теория Даниила Бернулли, российского академика швейцарского происхождения, объясняющая давление газа на стенки сосуда ударами молекул. В модели Бернулли газ состоял из частиц, движущихся «чрезвычайно быстро в различных направлениях». Он сделал расчеты на основе законов Ньютона и пришел к выводу, что давление пропорционально плотности газа и квадрату скорости его молекул (1738). С помощью своей модели Бернулли объяснил известный к тому времени закон Бойля — Мариотта: если при постоянной температуре увели-

чить в какое-то число раз объем газа, то его давление уменьшится во столько же раз.

Но следующий шаг в развитии молекулярно-кинетической теории — объяснение на основе законов механики, что такое теплота и температура, — удалось сделать лишь через 100 с лишним лет, в середине XIX века. Такая «неспешность» объясняется тем, что лишь к этому времени в механике сформировалось понятие энергии.

Вообще, в понятиях «теплота» и «температура» до середины XVIII века царил путаница. И хотя в первой половине XVIII века научились делать термометры, неясно было, что конкретно они измеряют.

**Для измерения температуры выбирают две реперные точки и число делений между ними — так получается температурная шкала. Первые термометры в 1724 году начал делать Фаренгейт — не ученый, а стеклодув. Он принял за ноль температуру самой холодной зимы в своем городе, а за 100 градусов — нормальную температуру человеческого тела. Весьма неудобная шкала, но она до сих пор применяется в Англии и особенно в США. В Европе и России с 1730 года долгое время использовались термометры Реомюра. Шкала Реомюра базировалась на удобных реперных точках — температуре таяния льда и кипения воды, но разделен этот интервал был не на 100, а на 80 частей (градусов Реомюра). Привычная для нас шкала Цельсия применяется с 1744 года. В ней используются те же реперные точки, что и в шкале Реомюра, а температурный интервал между ними разделен на 100 частей.**

Ко второй половине XVIII века установили, что теплота — это то, чем обмениваются тела при тепловом контакте, а температура — то, что в итоге теплообмена станет одинаковым у всех тел в теплоизолированной системе. Так, поставив градусник под мышку (обеспечив тепловой контакт), мы ждем, когда сравняются наши с ним температуры.

Но лишь во второй половине XIX столетия молекулярно-кинетическая теория смогла разъяснить физический смысл понятий «теплота» и «температура».

Выяснилось, что теплота — это не то, что содержится в теле. В телах содержится *внутренняя (тепловая) энергия*, которая складывается из кинетической энергии теплового движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия друг с другом.

При тепловом контакте тела могут обмениваться энергией — она переходит от горячего тела к холодному. Этот процесс называют теплообменом. Переданная путем теплообмена энергия — это и есть теплота, полученная или отданная телом.

А что же одинаково у молекул разных тел при одной и той же температуре? Даниил Бернулли полагал, что скорость теплового движения. Но оказалось, что это не скорость, а *средняя кинетическая энергия молекул*. Температура связана со средней кинетической энергией молекул: чем больше одна, тем больше другая.

Можно представить ситуацию, когда температура столь низка, что тепловое движение молекул совсем прекращается. Очевидно, это самая низкая температура, возможная в природе, — «абсолютный холод». Если отсчитывать температуру от точки «абсолютного холода», выбрав размер шага, равный одному градусу шкалы Цельсия, то мы получим так называемую *абсолютную температурную шкалу*, или шкалу Кельвина. Абсолютный ноль температуры — ноль градусов Кельвина (0 К) равен минус 273,15 градуса Цельсия.

**Абсолютная температура  $T$  связана с температурой  $t$  по шкале Цельсия простой формулой:  $T = t + 273,15$  (градуса).**

Абсолютная температура и средняя кинетическая энергия теплового движения молекул пропорциональны друг другу.

**Средняя кинетическая энергия  $\varepsilon$  теплового (поступательного) движения молекул связана с абсолютной температурой  $T$  формулой:**

$$\varepsilon = \frac{3 kT}{2}$$

**где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.**

## ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Обобщая опытные факты, термодинамика установила самые общие законы (их принято называть «началами»), которым подчиняются тепловые процессы в любых системах.

В основе термодинамики лежит постулат, который называют *общим (или нулевым) началом термодинамики*: каково бы ни было начальное состояние изолированной системы, в ней в конце концов установится тепловое равновесие, при котором температуры всех частей системы равны. (Необходимость этого постулата была осознана физиками лишь ближе к середине XX века, так что он возник последним по счету.)

В 1850 году Рудольф Клаузиус сформулировал *первое начало термодинамики* — закон сохранения энергии применительно к тепловым процессам. Это начало «вызревало» параллельно с общефизическим законом сохранения энергии. Суть его такова: теплота, полученная системой, идет на изменение внутренней энергии системы и на совершение работы.

**Понятие работы сформировалось в механике. Если тело, к которому приложена сила, перемещается, то сила совершает работу. Работа силы изменяет кинетическую энергию тела. Работа может быть положительной (если сила действует в направлении перемещения) или отрицательной (если сила направлена против перемещения), а также равной нулю (если сила перпендикулярна перемещению). Так, если вы идете по ровной дороге с тяжелыми сумками, то силу для удержания сумок вы к ним прикладываете, но работу не совершаете, так как сила перпендикулярна перемещению.**

**В термодинамике работу может совершать только газ: расширяясь, он толкает поршень, совершая положительную работу. Чтобы сжать газ, наоборот, внешние силы должны совершить работу над ним. Твердые и жидкие тела свой объем практически не изменяют, то есть работу совершать не могут, и для них вся полученная теплота идет на увеличение внутренней энергии, т. е. на нагревание.**

Но самое знаменитое и «загадочное» из начал термодинамики — второе.

## ЗАГАДКА НЕОБРАТИМОСТИ

Опыт показывает, что не все процессы, в которых сохраняется энергия, возможны в природе. Например, когда горячее тело приводится в контакт с холодным, теплота всегда передается от горячего тела к холодному, а не наоборот, хотя передача тепла «наоборот» не противоречит закону сохранения энергии.

Другой пример. Пусть в двух половинах сосуда находятся различные газы, разделенные перегородкой. Если убрать перегородку, в процессе хаотического движения молекулы обоих газов распределятся по сосуду равномерно. А почему бы в процессе того же хаотического движения им снова не разделиться по двум половинам сосуда? Но нет, такого не бывает.

Когда камень падает на землю, вся его кинетическая энергия переходит в тепловую — в энергию движения молекул. Но мы никогда не наблюдаем обратный процесс: камень, лежащий на земле, подпрыгивает вверх из-за того, что часть его внутренней энергии перешла в механическую.

Если бы во всех приведенных примерах обратные процессы реализовались, это не привело бы к нарушению закона сохранения энергии. Однако в природе многие процессы *принципиально необратимы*.

Между тем все законы механики обратимы во времени, то есть они предсказывают: если в какой-то момент изменить скорости всех частиц на противоположные, они будут двигаться по тем же траекториям в обратную сторону. Как будто кассету, на которой записан фильм, перематывают назад.

Чтобы объяснить, почему некоторые процессы в природе принципиально необратимы, в термодинамике пришлось ввести ещё один постулат — второе начало.

Уникальность этого физического закона в том, что он имеет несколько не похожих друг на друга формулировок, и все они носят характер запретов. Первоначальные формулировки возникли при изучении принципов работы тепловых двигателей.

## ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ И ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Тепловые двигатели (или тепловые машины, как их сначала называли) начали строить уже в первой половине XVIII века — задолго до того, как были поняты физические принципы их работы, и даже до

того, как были сформулированы понятия работы и энергии. А к концу XVIII века тепловые машины уже повсеместно применялись на заводах и в шахтах. С попытки уяснить, как сделать тепловую машину более совершенной, и началась термодинамика как наука. Основоположником термодинамики по праву считается французский инженер Сади Карно. В своей работе 1824 года он исследовал условия превращения теплоты в механическую работу и выяснил путем рассуждений, как сделать идеальную тепловую машину.

*Тепловая машина – это устройство для превращения тепловой энергии в механическую работу.*

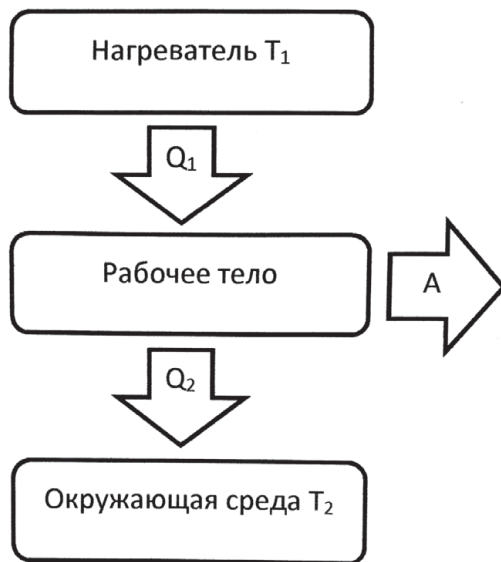
Тепловая машина должна непрерывно превращать теплоту в работу. Для этого газ («рабочее вещество») должен совершать *циклический* процесс, возвращаясь каждый раз в исходное состояние. Значит, после расширения газ надо сжать до первоначального состояния. Часть полученной при расширении работы приходится затрачивать на сжатие.

**В любом тепловом двигателе газу сообщают теплоту, чтобы он, расширяясь, совершал работу  $A_1$ . Затем на сжатие до первоначального состояния затрачивается работа  $A_2$ . Полезная работа двигателя  $A = A_1 - A_2$ . Для получения этой полезной работы мы затрачиваем теплоту  $Q_1$ , сжигая топливо. КПД тепловой машины по определению равен отношению полезной работы к затраченной теплоте:**

$$\text{КПД} = \frac{A}{Q_1}.$$

При сжатии газа некоторое количество теплоты  $Q_2$  выделяется в окружающую среду. Газ к концу цикла возвращается в исходное состояние, и его внутренняя энергия также возвращается к исходному значению. В «сухом остатке» за цикл газом получена энергия  $(Q_1 - Q_2)$  и совершена полезная работа  $A$ . Согласно первому началу,  $Q_1 - Q_2 = A$ . Значит,

$$\text{КПД} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$



Если бы *всю* полученную при сжигании топлива теплоту можно было превратить в полезную работу, КПД теплового двигателя был бы равен единице (100%). Такая возможность не противоречит первому началу термодинамики (закону сохранения энергии). Это гипотетическое устройство назвали «вечным двигателем второго рода», так как с его помощью можно было бы производить практически неограниченную работу за счет охлаждения океанов, атмосферы и земных недр. Запасы внутренней энергии земных недр столь внушительны, что при современном уровне потребления энергии температура окружающей среды за тысячу лет уменьшилась бы всего на один градус.

Но уже основатель термодинамики Сади Карно понял, что «вечный двигатель второго рода» невозможен. Все опыты свидетельствуют об этом. Поэтому эта невозможность была возведена в ранг постулата — *второго начала термодинамики*.

Одна из формулировок *второго начала термодинамики* звучит так: невозможен циклический процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара.

**Часть полученной от теплового резервуара теплоты обязательно «уйдет» в окружающую среду, так что КПД теплового двигателя принципиально меньше единицы (100%). У лучших тепловых двигателей КПД около 50%.**

Позднее оказалось, что можно сформулировать утверждения, на первый взгляд отличные от данного постулата, но тем не менее эквивалентные ему.

Например, Клаузиус предложил следующую формулировку второго начала: невозможна *самопроизвольная* передача теплоты от холодного тела горячему.

Тот факт, что в холодильнике (холодильной машине) теплота забирается у холодных тел, находящихся в камере, и отдается в более теплую окружающую среду, не противоречит этому утверждению, ведь это происходит не самопроизвольно — над рабочим телом совершается работа за счет потребляемой холодильником электроэнергии. За эту работу мы и платим.

Тепловые и холодильные машины неизбежно выделяют теплоту в окружающую среду, что вносит ощутимый вклад в ее тепловое загрязнение. Этот эффект усугубляется ещё и тем, что при сгорании топлива повышается концентрация углекислого газа в атмосфере, что приводит к «парниковому эффекту». Кроме того, при сжигании топлива в тепловых двигателях расходуется атмосферный кислород. В наиболее развитых странах тепловые двигатели уже сегодня потребляют больше кислорода, чем вырабатывается всеми растениями, растущими в этих странах.

## ВТОРОЕ НАЧАЛО И ЭНТРОПИЯ

Понятие энтропии ввел всё тот же Рудольф Клаузиус в 1865 году, пытаясь перевести второе начало термодинамики на язык математики. Причем он определил не энтропию как таковую, а ее изменение, связанное с полученной или отданной теплотой (термин «энтропия» происходит от греческого «тропэ» — изменение). Тут важно, при какой температуре происходит получение или отдача теплоты.

**Согласно определению Клаузиуса, если тело, имеющее абсолютную температуру  $T$ , получило теплоту  $Q$ , то его энтропия возросла на величину  $\Delta S = Q/T$ , а если тело отдало теплоту, то его энтропия уменьшилась на эту величину. При самопроизвольной передаче теплоты от горячего тела к холодному энтропия системы, состоящей из этих двух тел, увеличивается. В самом деле, энтропия горячего тела**

уменьшилась на  $Q/T_1$ , а холодного — возросла на  $Q/T_2$ .  
Поскольку  $T_1 > T_2$ , суммарная энтропия системы возросла.

На языке энтропии второй закон термодинамики гласит: *в замкнутой системе энтропия не может убывать*. (Подчеркнем, что речь идет только о замкнутой системе, которая не обменивается с окружающими телами энергией или работой.) В принципе, энтропия может оставаться постоянной, если в системе происходят только равновесные процессы, при которых система проходит через ряд последовательных состояний теплового равновесия. Равновесные процессы обратимы: в любой момент их можно «повернуть вспять», так что система будет проходить через те же самые промежуточные состояния в обратном направлении. Но равновесные процессы — это недостижимый идеал, поэтому энтропия реальных изолированных систем всегда растет, и второе начало термодинамики часто называют «законом возрастания энтропии».

Но вам наверняка знакома другая трактовка понятия энтропии — как меры беспорядка в системе. В такой интерпретации термин «энтропия» вышел за рамки термодинамики — он используется и в экономике, и в теории информации, и в социологии.

Понятно, что такое беспорядок, скажем, в комнате. А что значит «беспорядок» в термодинамической системе, например, газе? Общее (нулевое) начало термодинамики гласит, что любая изолированная система самопроизвольно приходит в состояние теплового равновесия, при котором кинетические энергии всех молекул в среднем равны, скорости молекул направлены хаотично и молекулы распределены по сосуду в среднем равномерно (если это газ). Такое состояние характеризуется максимальной вероятностью реализации — это и означает максимальный беспорядок. Гораздо менее вероятны различные упорядоченные состояния, при которых или скорости всех молекул случайно окажутся направлены в одну сторону, или все молекулы случайно соберутся в одной части сосуда, или в одной половине сосуда окажутся более быстрые молекулы, чем в другой... Чем более упорядоченно и сложно организована структура вещества, тем меньше его энтропия. Так, энтропия кристалла гораздо меньше, чем газа, потому что в кристалле атомы расположены упорядоченно, а хаос проявляется лишь в их тепловых колебаниях около узлов решетки.

Таким образом, закон возрастания энтропии (второе начало термодинамики) означает, что *предоставленная самой себе система переходит от менее вероятных (упорядоченных) состояний к более вероятным (неупорядоченным)*. А из-за огромного числа участников событий — молекул — статистическая вероятность превращается в абсолютную невозможность или, наоборот, достоверность.

**Законы теории вероятностей позволяют рассчитать частоту реализации тех или иных комбинаций при игре в карты, кости, рулетку... Но мы знаем, что в казино иногда случаются очень маловероятные события. Почему же такие события не случаются в термодинамических системах? Проведем простой расчет. Пусть в сосуде находится  $N = 1000$  молекул (это очень-очень мало!). Каждая из них с вероятностью  $\frac{1}{2}$  может оказаться в выбранный момент в левой половине сосуда. Вероятность того, что все молекулы в этот момент случайно попадут в левую половину сосуда, равна  $(\frac{1}{2})^N = (\frac{1}{2})^{1000} \approx 1/10^{300}$  (это число ноль, у которого после запятой 300 нулей перед цифрой 1) — совершенно невероятное событие. А в реальных системах молекул не 1000, а порядка  $10^{23}$  (число Авогадро)! Но если бы молекул было всего 4, то вероятность такого события была бы  $(\frac{1}{2})^4 = 1/16$ , и оно реализовалось бы достаточно часто.**

Количественно связал энтропию с вероятностью реализации состояния Людвиг Больцман в 1877 году.

Все необратимые самопроизвольные процессы — это неравновесные процессы, в которых энтропия возрастает. Например, при падении камня на землю кинетическая энергия упорядоченного движения (вниз) переходит в энергию хаотического движения молекул: порядок сменяется беспорядком, энтропия растет. В состоянии теплового равновесия энтропия максимальна.

Энтропию называют «стрелой времени»: будущему Вселенной соответствует большее значение энтропии (если предположить, что Вселенная — это изолированная система). Закон возрастания энтропии приводит к мысли (которую и высказал Клаузиус), что энтропия Вселенной когда-нибудь достигнет максимума, то есть Вселенная придет в состояние теплового равновесия: температура станет одинаковой во

всех точках Вселенной, прекратятся какие бы то ни было тепловые процессы, наступит *тепловая смерть* Вселенной.

Позднее выяснилось, что вывод о тепловой смерти Вселенной неосостоятелен, и причиной этому – всемирное тяготение. Из-за тяготения однородное распределение вещества во Вселенной не означает максимума энтропии, поскольку не является наиболее вероятным. В нашей нестационарной Вселенной первоначально однородное вещество под действием тяготения образует скопления галактик, сами галактики, звезды... С учетом действия тяготения эти процессы отвечают росту энтропии Вселенной – в согласии со вторым началом термодинамики. Тепловая смерть отменяется!

**Правда, некоторые квантовые теории предсказывают Вселенной в невозможно далеком будущем (через  $10^{100}$  лет) нечто худшее, чем классическая тепловая смерть: исчезнет всё привычное вещество, и останется лишь расширяющийся и охлаждающийся нейтринно-фотонный газ. Но это лишь один из гипотетических сценариев далекого будущего.**

## **ВТОРОЕ НАЧАЛО И «ДЕМОНЫ»**

Второе начало термодинамики и утверждение о необратимости тепловых процессов долгое время подвергались сомнению. До 20-х годов XX века, пока не была создана квантовая механика, второе начало термодинамики продолжало нести в себе некую загадку. Оставалось до конца непонятно: раз движение каждой из частиц описывается уравнениями механики Ньютона, которые обратимы во времени, то почему же поведение всей системы становится необратимым при большом числе частиц? В самом деле, кинофильм про движение в изолированном сосуде нескольких частиц можно «перематывать» в прямом и обратном направлениях, и он будет одинаково реалистичным. А когда в игре участвуют молекулы, процессы вдруг становятся необратимыми.

Физики придумывали различные мысленные эксперименты с участием всемогущих «демонов», итогом которых становилось нарушение второго начала термодинамики.

Так, в 1880-х годах австрийский физик Лошмидт предложил мысленный эксперимент, который получил название «демона Лошмидта». Пусть газу, изначально занимавшему половину сосуда, позволили рас-

ширяться. В тот момент, когда газ займет весь сосуд, некто («демон») изменит направления скоростей всех частиц на противоположные. Тогда эволюция системы должна пойти в обратном направлении, подобно кинофильму, прокручиваемому в обратную сторону: молекулы станут собираться в одной половине сосуда, и энтропия будет возрастать. В то время Людвиг Больцман смог возразить лишь словами: «Попробуйте их повернуть!», но этого было недостаточно для разрешения парадокса.

В 1960-х годах с помощью компьютеров эксперимент Лошмидта удалось провести методом численного моделирования. Оказалось, что даже цифровые «молекулы» после некоторого числа соударений полностью «забывали» событие поворота, и система снова двигалась в сторону равновесного состояния.

Подумаем, почему даже «компьютерные молекулы» после точки поворота не двигались *точно* по тем же траекториям в обратном направлении? Очевидно, точность расчета компьютера содержит пусть очень малую, но погрешность. По мере удаления от момента поворота из-за огромного числа частиц-участниц погрешность стремительно нарастает.

А возможно ли *в принципе* точно обратить движение реальной частицы, заставив ее двигаться по прежней траектории в обратном направлении? В макромире, где правит механика Ньютона, это возможно. Но в микромире, как выяснилось в XX веке, иные законы: точных траекторий у микрочастиц нет вообще, там царит неопределенность (см. след. часть книги). Молекулы находятся, так сказать, на грани миров: они всё же довольно велики, и иногда применение к ним законов макромира дает неплохие результаты, но в некоторых ситуациях проявляются уже законы микромира. В частности, их траектории приближительны, и точно повернуть вспять их движение невозможно.

Итак, раскрытие «тайны» второго начала термодинамики — это заслуга не только статистики, но и квантовой механики.

**Развитие физики — это драма идей. А иногда и судеб.  
Драматична судьба Людвигу Больцмана (1844–1906) —  
физика, раскрывшего статистический смысл энтропии.  
К концу XIX века вокруг молекулярно-кинетической теории  
вовсю кипели страсти. А Людвиг Больцман был  
удивительным человеком — страстным и восторженным.  
В науке для него компромиссов не существовало. Студенты**

обожали его лекции — ведь Больцман и преподавал со страстью. Но среди коллег он имел репутацию человека с трудным характером, поэтому место работы приходилось часто менять, и везде он вел борьбу за атомистику. Людвиг Больцман принимал близко к сердцу все нападки на второе начало термодинамики. В 1898 году он писал: «Я сознаю, что сейчас являюсь единственным, кто пытается плыть против течения...». Он покончил с собой в 1906 году, так и не дождавшись триумфального признания молекулярно-кинетической теории. У него не было личных драм — только драматическая невозможность вывести второе начало термодинамики из законов классической механики.

## ЧТО ЕЩЁ ИЗУЧАЮТ ТЕРМОДИНАМИКА И МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Два взаимодополняющих подхода к изучению тепловых явлений — термодинамический и молекулярно-кинетический — позволили разобраться в тепловых свойствах различных веществ, объяснить особенности их фазовых превращений, предсказать неизвестные ранее состояния вещества (критическое и сверхкритическое состояния) и еще многое другое.

Почему, к примеру, водяной лед на Марсе не плавится в летние месяцы, а превращается сразу в пар? (На Земле так же ведет себя «сухой лед» — твердая углекислота.) Оказалось, что любое кристаллическое вещество при достаточно низком давлении ведет себя при нагревании именно так — превращается не в жидкость, а в пар. Что значит «достаточно низкое», каждое вещество «решает» индивидуально, а молекулярно-кинетическая теория, анализируя особенности взаимодействия молекул разных веществ, объясняет и предсказывает поведение веществ.

Или почему некоторые газы (водяной пар, эфир, углекислый газ) можно превратить в жидкость, просто увеличив давление (сильно сжав), а многие другие газы (кислород, азот, водород) не сжижаются, как их ни сжимай? Оказалось, для каждого вещества есть своя температура — ее называют критической. Превратить газ в жидкость можно только при температуре меньше критической. На основе моделей молекулярного строения веществ можно вычислить их критические температуры. Для воды, эфира, углекислоты критические температуры

гораздо выше комнатной (для воды — целых 374 °C!), поэтому их пары легко сжижаются при сжатии. А вот для кислорода, азота, водорода и других газов критические температуры очень низкие. Самая низкая — у гелия: 5 градусов Кельвина, или минус 168 °C. Все эти газы требуют предварительного охлаждения для превращения в жидкость.

Особыми свойствами обладают вещества при температурах выше критической и очень высоком давлении — это так называемое сверхкритическое состояние вещества, когда вещество в чем-то похоже на жидкость, а в чем-то на газ. Довольно широко используется сверхкритическая углекислота как растворитель органических веществ. Воду перевести в сверхкритическое состояние достаточно трудно, поскольку для этого требуется давление больше 220 атм. Зато сверхкритическая вода растворяет практически все органические соединения, которые не разлагаются при высоких температурах. Такая вода, при добавлении в нее кислорода, превращает за несколько минут любые органические соединения в воду и углекислый газ. Сейчас рассматривают возможность перерабатывать таким способом бытовые отходы, прежде всего пластиковую тару (сжигать такую тару нельзя, так как при этом возникают токсичные летучие вещества).

Сегодня термодинамика продолжает развиваться. Ее применяют при изучении неравновесных процессов и нестандартных систем — от живых организмов до черных дыр. Как самостоятельная дисциплина от термодинамики «отпочковалась» синергетика — наука, изучающая возможности спонтанного возникновения порядка из беспорядка в результате процесса самоорганизации сложных открытых (то есть взаимодействующих с окружающей средой) систем. Синергетика открывает путь к пониманию функционирования биологических систем и разгадке тайны возникновения жизни на Земле.

## **ГЛАВА 4. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА**

### **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛЫ**

Весь макромир «держится» на электрическом взаимодействии. Электроны притягиваются к ядру, поэтому существует атом. Взаимодействие нейтральных молекул друг с другом — тоже электрическое,

все предметы существуют и не распадаются на части благодаря этому взаимодействию.

Все силы, с которыми мы встречаемся в механике, кроме гравитационных, имеют электрическую природу. Механические, химические, оптические свойства вещества связаны с электрическим (точнее говоря, электромагнитным) взаимодействием.

Сейчас трудно поверить, что три-четыре столетия назад мы ничего не знали об электричестве и магнетизме, кроме двух простых фактов, известных с глубокой древности:

1) если янтарь натереть шерстью, он притягивает легкие предметы (это явление называют электризацией трением, и оно описано Фалесом Милетским в VI веке до н. э.);

2) свободно подвешенная магнитная стрелка указывает одним концом на север, другим – на юг (факт упоминается в китайских рукописях XI века до н. э.).

Если механика к концу XVII века уже сформировалась как целостная теория, то знания об электричестве в XVII веке обогатились лишь одним фактом: существует не только электрическое притяжение, но и отталкивание. В 1733 году Шарль Франсуа Дюфэ ввел понятие *электрического заряда*, характеризующего взаимодействие наэлектризованных тел. Он предположил, что есть два вида электрических зарядов. Дюфэ назвал эти два вида стеклянным и смоляным электричеством и показал, что одноименно заряженные тела отталкиваются, а разноименно заряженные притягиваются (рис. 5).

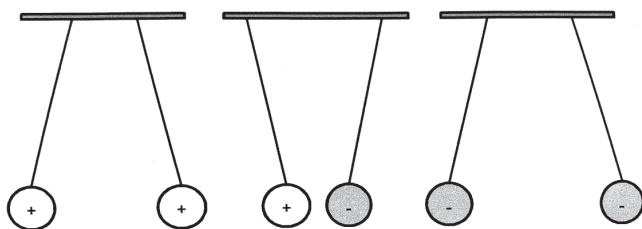


Рисунок 5. Взаимодействие одноименно и разноименно заряженных тел

Следующий важный шаг сделал в 1750 году Бенджамин Франклин: он присвоил разным сортам зарядов разные знаки. Янтарь, наэлек-

тризованный мехом, по его выбору стал отрицательным (поэтому и по сей день заряд электрона мы считаем отрицательным).

Что же такое электрический заряд? Это некое особое свойство, благодаря которому частицы вещества участвуют в электромагнитном взаимодействии. Электрический заряд, как и масса, является одной из основных, первичных характеристик субатомных частиц. Конкретнее на данном этапе мы определить заряд не можем. Он присущ не всем элементарным частицам вещества (что касается массы, то также существуют безмассовые частицы, например, фотон). Кстати, наличие или отсутствие заряда на массу элементарных частиц совершенно не влияет.

Постепенно накапливались знания о свойствах заряда. Так, в начале XX века окончательно подтвердилась догадка Франклина и Фарадея о том, что существует минимальная порция заряда. Эта порция равна заряду электрона.

Эпоха количественных исследований взаимодействия электрических зарядов началась в 1785 году — через 100 лет после публикации книг по механике Ньютона. Шарль Кулон доказал, что закон взаимодействия зарядов по форме повторяет закон всемирного тяготения: электрическая сила убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между зарядами (поэтому эти законы называют «законами обратных квадратов»).

**Закон Кулона (1785): сила взаимодействия двух зарядов ( $q_1$  и  $q_2$ ) пропорциональна величине обоих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния ( $r$ ) между ними:**

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2} .$$

**Нужен или нет в этой формуле постоянный размерный множитель, зависит от выбора единиц измерения заряда. Так, у физиков популярна система единиц СГС (сантиметр-грамм-секунда), в которой в законе Кулона просто стоит знак равенства, и этот закон является основой для определения единицы заряда в этой системе единиц.**

Электрические силы — гигантские по сравнению с гравитационными. Если бы в наших телах отрицательных электронов оказалось бы

на 1% меньше или больше, чем положительных протонов, то сила нашего электрического взаимодействия была бы равной весу земного шара! При электризации трением лишь ничтожная доля электронов переходит с одного тела на другое.

## **ЗАКОНЫ «ОБРАТНЫХ КВАДРАТОВ» И ТРЕХМЕРНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА**

Иммануилу Канту принадлежит глубокая мысль о том, что свойства пространства как-то связаны с конкретными физическими законами, действующими в нем. В начале XX века голландский физик Пауль Эренфест развил и обосновал эту мысль. Он показал, что *квадрат* расстояния в законе всемирного тяготения и законе Кулона возникает из-за трехмерности пространства. А если бы мы жили, скажем, в четырехмерном пространстве, то кулоновская сила и сила тяготения убывали бы обратно пропорционально кубу расстояния. Но, как показал тот же Эренфест, в четырехмерном пространстве (а также в любом другом, кроме трехмерного) невозможны устойчивые орбиты планет. Значит, и жизнь в известной нам форме не могла бы существовать в таких пространствах!

Так, спустя 230 лет после появления механики Ньютона была обоснована необходимость законов обратных квадратов, а также стало ясно, почему мы живем именно в трехмерном пространстве.

**После вывода Эренфеста, казалось бы, отпадает необходимость экспериментального доказательства закона обратных квадратов — его доказывает уже сам факт нашего существования. Тем не менее закон всемирного тяготения и закон Кулона многократно проверялись и продолжают проверяться в экспериментах. Сейчас физики стремятся проверить справедливость этих законов на очень малых расстояниях. Дело в том, что на невообразимо малых расстояниях структура нашего пространства-времени может быть совсем иная. В настоящее время имеется множество теорий, которым удастся вывести многие свойства нашего трехмерного мира исходя из того, что на очень малых расстояниях пространство не трехмерно, а многомерно (мы познакомимся с одной из таких теорий — теорией суперструн — в следующей части этой книги). Современные**

**экспериментаторы надеются выявить присутствие дополнительных измерений по нарушению закона Кулона на сверхмалых расстояниях. Есть надежда, что эксперименты на Большом адронном коллайдере помогут прояснить этот вопрос.**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК**

Рубеж XVIII–XIX веков ознаменовался важным открытием, имевшим огромные научные последствия. Речь идет об открытии первого источника постоянного тока – гальванического элемента, или элемента Вольта.

Гальваническим его назвали в честь врача Луиджи Гальвани, который случайно обнаружил, что при касании лапки лягушки двумя разными металлическими предметами ее мышца сокращается. Отсюда он сделал неверный вывод о существовании особого «животного электричества».

Физик Алессандро Вольта доказал на опыте, что «животное» здесь ни при чем: он заменил лапку раствором соли или кислоты. При помещении в раствор серебряной и цинковой пластин на них возникали заряды разного знака (правильнее сказать, между пластинами появлялось электрическое напряжение). А при замыкании пластин проводом по нему тек постоянный электрический ток. Для увеличения тока можно соединять много таких элементов друг с другом последовательно. Так в 1800 году появилась возможность создавать постоянный ток.

**Вы можете сделать гальванический элемент, просто взяв яблоко или картофель и воткнув в него два гвоздя из разных металлов, например медный и железный. От такого элемента могут работать, к примеру, маленькие электронные часы.**

Но прошло ещё 20 лет до настоящего рождения электродинамики – целостной теории электромагнитных явлений. Только после 1820 года сформировалась современная терминология и были установлены основные законы электромагнетизма, в том числе законы постоянного тока.

Электрический ток — это упорядоченное движение заряженных частиц: «носителей тока». Чтобы возник ток, необходимо, во-первых, наличие таких носителей — заряженных частиц, способных свободно перемещаться, а во-вторых, постоянное действие электрической силы, заставляющей заряды двигаться в определенном направлении.

Те вещества, в которых имеются носители тока, называют проводниками. Таковыми являются все металлы (носителями тока в них являются свободные электроны), электролиты — растворы солей, кислот, щелочей (носителями тока в них служат ионы). При определенных условиях ток может протекать и через газы.

Почему заряженные частицы в проводниках не могут перемещаться по инерции, без постоянно подталкивающей их силы? Могут, но только очень короткое время, а потом их движение прекращается, потому что в проводнике возникает сопротивление их движению. Движение зарядов в проводнике при протекании постоянного тока можно уподобить движению санок по снегу: хочешь, чтобы санки двигались равномерно, — тащи их за веревку. Такой «веревкой» для носителей тока является электрическая сила. Перемещая заряды по участку цепи, эта сила совершает работу. Мерой этой работы является *напряжение* на участке цепи. Для создания же напряжения нужно специальное устройство — источник тока, например гальванический элемент.

Протекание постоянного электрического тока по цепи подобно циркуляции воды по трубам, например, отопительной системы. Из-за вязкости воды ее движение по трубам тоже связано с некоторым сопротивлением, и для создания и поддержания непрерывной циркуляции воды нужен насос — аналог источника тока.

**Закон Ома связывает силу тока  $I$ , сопротивление  $R$  участка цепи и напряжение  $U$  на этом участке:  $U = I \times R$ , или  $U = I/R$ . Напряжение измеряют в вольтах (В), силу тока — в амперах (А), сопротивление — в омах (Ом). Электрический ток представляет угрозу для человека, а степень угрозы определяется силой тока. Переменный ток опаснее постоянного, поскольку может вызвать нестабильную работу сердца. Безопасным считается переменный ток силой до 0,01 ампера, а ток силой 0,1 ампера уже смертельно опасен. Каким напряжениям соответствуют такие токи,**

зависит от сопротивления тела человека. Главное сопротивление обеспечивает наружный роговой слой кожи. Если кожа чистая и сухая, без повреждений, то даже подключение к напряжению в 1000 вольт может обойтись без последствий (особенно у жителей гор бывает такая «дубленая» кожа). У нервного человека кожа потеет, и ее сопротивление сильно падает, делая человека уязвимым для удара током. Порогом, после которого напряжение может стать опасным, признано значение в 50 вольт.

В 1911 году было сделано замечательное открытие: оказывается, при очень низких температурах возможно протекание тока абсолютно без сопротивления, а значит, источник тока в сверхпроводящем контуре не нужен. Это явление назвали *сверхпроводимостью*. Объясняется оно на основе квантовых законов. Переход обычного проводника в сверхпроводящее состояние происходит при определенной «критической» температуре, зависящей от рода вещества.

**Сверхпроводники — идеальный материал для создания сильных электромагнитов: ведь в сверхпроводнике можно создавать большие токи, не затрачивая энергии. Правда, энергия требуется для охлаждения проводов электромагнита до сверхнизких температур. Сверхпроводящие магниты используют, например, в ускорителях, а также в маглевах — поездах на магнитной «подушке».**

## РОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Поворотным событием для науки об электромагнетизме стал опыт Эрстеда 1820 года, показавший, что электричество и магнетизм связаны друг с другом.

Открытие, прославившее имя Эрстеда, произошло, говорят, случайно. Эрстед на лекции демонстрировал нагревание проволоки электрическим током. Рядом с проволокой на столе оказался компас. Кто-то из студентов заметил, что при замыкании электрической цепи магнитная стрелка компаса отклонилась в сторону.

Этот, казалось бы, простой факт произвел революцию в умах физиков. У французского физика Андре Мари Ампера сразу же родилась гениальная мысль о возможности связать все явления магнетизма с движением зарядов. Так родилась новая наука, которую Ампер назвал электродинамикой. Завершил же построение классической электродинамики Максвелл 45 лет спустя, в 1865 году.

**На основе открытия Эрстеда Ампер сделал первый прибор для измерения силы тока (и, кстати, ввел сам термин «сила тока» — не случайно единицу измерения силы тока через много лет, в 1893 году, назвали ампером). Это было устройство со свободно подвешенной намагниченной иглой, которая отклонялась под действием тока, позволяя, таким образом, судить о его силе. Этот прибор позволил в дальнейшем сделать много новых открытий. С его помощью были установлены законы цепей постоянного тока, а также закон электромагнитной индукции.**

В основе электродинамики лежат два утверждения:

- Магнитное поле создается электрическими токами, то есть движущимися зарядами.
- Магнитное поле действует на электрические токи, то есть на движущиеся заряды.

Из этих двух постулатов следует, что электрические токи должны действовать не только на магнит, но и друг на друга, что Ампер вскоре и продемонстрировал. Так, две катушки с током (Ампер назвал их соленоидами) взаимодействуют друг с другом, как магниты: одними концами они притягиваются, а другими — отталкиваются (рис. 6). Ему удалось наблюдать и взаимодействие прямых параллельных токов: токи, текущие в одну сторону, притягиваются, а в противоположные стороны — отталкиваются. Силу взаимодействия токов называют теперь силой Ампера.

Чтобы объяснить магнитные свойства земного шара, Ампер предположил, что в его недрах циркулируют токи. Как мы теперь понимаем, эти токи возникают в железном жидком внешнем ядре из-за вращения Земли.

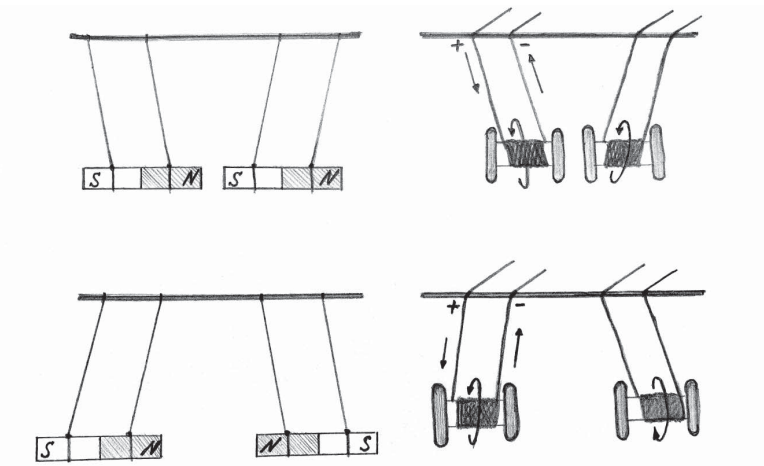


Рисунок 6. Катушки с током взаимодействуют, как постоянные магниты

Но что общего у постоянных магнитов с токами? Ампер высказал чрезвычайно плодотворную гипотезу о том, что внутри магнитных веществ (таких как железо или никель) имеются круговые микротоки (молекулярные токи). Если вещество не намагничено, эти микротоки ориентированы хаотично (то есть текут в различные стороны). Будучи помещенными в поле другого магнита, микротоки ориентируются одинаково — и вещество намагничивается (рис. 7).

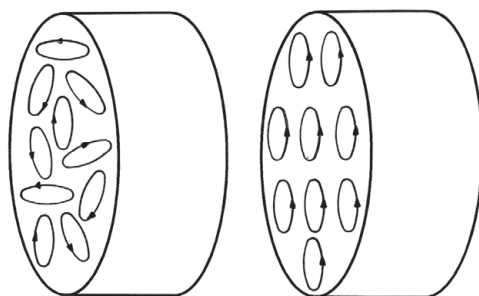


Рисунок 7. Ненамагниченное (слева) и намагниченное вещество

## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

До Ампера считалось, что магнетизм присущ только немногим веществам, «родственникам» железа, — их называют ферромагнетиками. Но было бы странно, если бы круговые микротоки существовали только

в ферромагнетиках. Ампер предположил, что все вещества в какой-то степени могут быть намагничены, и это предположение в 1845 году блестяще подтвердил на опыте Майкл Фарадей. Правда, магнитные свойства всех остальных веществ, кроме ферромагнетиков, очень слабые.

Фарадей подвешивал на длинной нити образцы между полюсами сильного магнита. Оказалось, что все вещества так или иначе реагируют на магнит. Но одни образцы притягивались к ближайшему полюсу магнита, а другие отталкивались от обоих полюсов. Если брать образцы в форме стерженьков, то первые устанавливались вдоль оси магнита, а вторые — поперек. Так возникли термины: парамагнетик (*от греч.* «пара» — вдоль) и диамагнетик («диа» — поперек) (рис. 8). обстоятельный Фарадей перепробовал множество неорганических и органических веществ и убедился, что большинство из них — диамагнетики.

**Магнитные свойства веществ связаны с электронными токами в атомах. Детально объяснить эти свойства смогла лишь квантовая теория.**

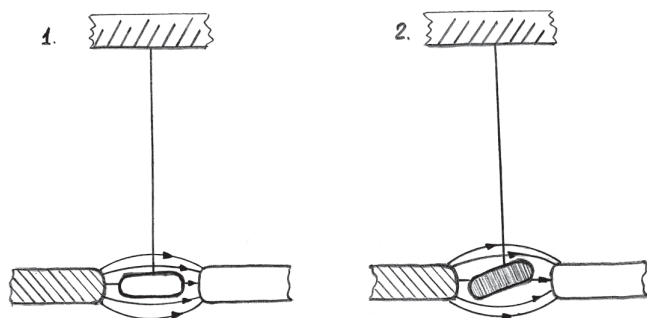


Рисунок 8. Парамагнетик (1) и диамагнетик (2) между полюсами магнита

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Закон Кулона столь похож на закон всемирного тяготения Ньютона, что сразу возник соблазн трактовать электрическое взаимодействие по аналогии с гравитационным. А так как в механике уже более 100 лет было принято считать, что гравитационная сила мгновенно передается через пустоту (ведь между планетами пустота!), то это

представление автоматически было перенесено и на электромагнитные взаимодействия. Концепция «действия через пустоту» была общепринятой до середины XIX века.

**Хотя сторонники «действия через пустоту» ссылались на Ньютона, сам Ньютон признавался, что проблема действия через пустоту на любые расстояния беспокоит его, но данных опыта для ее решения пока нет: «Предполагать, что тело может действовать на другое тело на любом расстоянии в пустом пространстве, без посредства чего-либо передавая действие и силу, — это, по-моему, абсурд... Тяготение должно вызываться чем-то или кем-то постоянно действующим по определенным законам. Является ли, однако, это нечто материальным или нематериальным, решать это я предоставил моим читателям».**

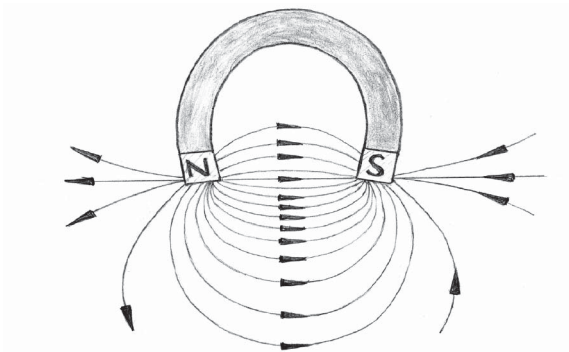
Только в России в середине XVIII века петербургские академики Эйлер, Рихман и Ломоносов предвосхитили идею электрического поля. Они впервые заговорили об особой «электрической материи», возбуждаемой вокруг заряженного тела и воздействующей на другие заряженные тела.

Через 80 лет (около 1830 года) Майкл Фарадей заново пришел к идее электромагнитного поля — особой среды, передающей действие электрических и магнитных сил. Сам же термин «поле» ввел позднее (в 1865 году) Максвелл, и он же завершил построение полной теории электромагнитных полей.

**Майкл Фарадей (1791–1867), сын лондонского кузнеца, с 12 лет работавший переплетчиком в книжном магазине, заинтересовался содержанием умных книг, которые ему приходилось переплетать. В 19 лет ему удалось стать ассистентом известного химика сэра Дэви — у Фарадея были золотые руки и светлая голова. А к 30 годам он стал одним из выдающихся физиков эпохи. Русский физик Столетов писал о нем: «Никогда со времен Галилея свет не видал столько поразительных и разнообразных открытий, вышедших из одной головы». Но математикой Фарадей не владел совершенно — свыше тысячи страниц его трудов**

**не содержат ни одной формулы, за что более образованные коллеги смотрели на Фарадея немного свысока и не спешили вникать в его труды.**

Хотя сами поля невидимы, об их присутствии можно узнать: об электрическом – по его действию на заряды, о магнитном – по воздействию на токи или магнитные вещества. Для наглядности Фарадей придумал изображать электрическое и магнитное поля графически с помощью силовых линий (рис. 9). Эти воображаемые линии можно сделать видимыми! Так, например, железные опилки выстраиваются вдоль линий магнитного поля и перемещаются туда, где поле сильнее (рис. 10). Похожим образом ведут себя крохотные незаряженные частицы (типа манной крупы) в электрическом поле заряженных тел.



*Рисунок 9. Силовые линии поля постоянного магнита*



*Рисунок 10. Железные опилки в поле кругового витка с током*

Для количественного описания полей были введены их характеристики: напряженность и потенциал электрического поля, вектор магнитной индукции для магнитного поля.

Окончательно убедиться в том, что поля реально существуют и несут в себе энергию, смогли лишь после того, как Максвелл сначала предсказал существование электромагнитных волн, а затем Генрих Герц их обнаружил на опыте в 1885–1889 годах.

Но что же представляет собой эта электрическая или магнитная материя — поле? Эту тайну разгадали к середине XX века, когда была создана квантовая электродинамика. Об этом мы поговорим в следующей части книги.

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ**

До поры до времени казалось, что электрическое и магнитное поля существуют независимо друг от друга. Но в 1831 году Майкл Фарадей открыл *явление электромагнитной индукции*, которое привело к изменению этой точки зрения.

Фарадей обнаружил, что если перемещать проводящий контур в поле магнита так, чтобы число магнитных силовых линий, охватываемых контуром, изменялось, то в контуре возникает электрический ток — он назвал его *индукционным* (то есть наведенным). Число охватываемых контуром магнитных силовых линий определяет так называемый магнитный поток.

Многочисленные эксперименты Фарадея показали, что магнитный поток можно изменять любым способом: перемещать или поворачивать контур в магнитном поле или магнит рядом с контуром — в любом случае в контуре появляется индукционный ток, сила которого тем больше, чем быстрее происходит изменение потока.

Открытое Фарадеем явление, без преувеличения, повлияло на техническое развитие нашей цивилизации — ведь оно легло в основу создания генераторов переменного тока.

**Принцип действия электрогенератора прост: надо вращать или проводящую рамку в поле постоянного магнита, или, наоборот, вращать магнит внутри рамки (последнее оказалось технологически удобнее). На вращение затрачивается механическая работа, которая и преобразуется в электрическую энергию тока.**

**Механическую же работу можно получить от энергии ветра, падающей воды или теплового двигателя. В свою очередь, тепловой двигатель может получать тепловую энергию от сжигания топлива, от геотермальных источников, от атомного реактора... Электрическая энергия переменного тока питает все наши электроприборы и устройства, от лампочек до компьютеров. Преобразование энергии из одних видов в другие — основа нашей цивилизации.**

Но почему возникает индукционный ток при движении магнита? Что за сила заставляет двигаться электроны внутри проводящего контура, создавая ток? Объяснение нашел Максвелл 30 лет спустя после открытия явления электромагнитной индукции.

Он рассуждал так: на заряды неподвижного контура магнитные силы не действуют, поэтому единственная возможность объяснить их движение — допустить возникновение электрического поля в проводнике. Это поле отличается от электрического поля, создаваемого зарядами, тем, что его силовые линии не имеют начала и конца — они замкнуты сами на себя, так что могут перемещать заряды в проводнике по замкнутому контуру без всяких источников тока. Такие поля называют вихревыми.

**Джеймс Кларк Максвелл (1831–1879) родился в год открытия явления электромагнитной индукции. Пожалуй, он был единственным, кто смог прочесть все труды Фарадея и разобраться в них, и один из немногих, кто поверил в реальность электромагнитного поля. Максвелл перевел на язык математики все идеи и формулировки Фарадея, переписав, по сути, заново его работы.**

Итак, Максвелл сформулировал постулат: **изменяющееся со временем магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.** (Естественно, этот постулат выражается и неким уравнением, позволяющим правильно вычислять порождаемое поле и индукционные токи.)

Иногда вера в красоту законов природы приводит физиков к новым гениальным идеям. Максвелл верил в симметрию взаимозависи-

мости электрического и магнитного полей, и эта вера подтолкнула его к ещё одному постулату: **изменяющееся со временем электрическое поле порождает магнитное поле.**

Эти два постулата Максвелла стали недостающими звеньями для построения полной теории электромагнитных полей.

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ**

Сначала теория Максвелла не пользовалась поддержкой большинства ведущих физиков, которые оставались сторонниками мгновенной передачи взаимодействий через пустоту.

Чтобы кардинально новая теория получила признание, она должна предсказать нечто, доселе неизвестное. Из теории Максвелла вытекала неизбежность существования электромагнитных волн — процесса распространения в пространстве взаимосвязанных и рождающих друг друга электрического и магнитного полей.

**О существовании электромагнитных волн первым объявил Максвелл. А в 1938 году сотрудники библиотеки Лондонского королевского общества нашли запечатанный конверт, датированный 1832 годом, с надписью: «Новые воззрения, подлежащие в настоящее время хранению в архивах Королевского общества». Там было послание Фарадея потомкам, в котором он сообщал о своей уверенности в существовании электромагнитных волн и сожалел, что современники не готовы разделить его взгляды.**

Подобно тому, как по поверхности воды начнут распространяться волны, если в одном месте создать начальное возмущение (например, бросив камень или покачав поплавок), для возбуждения электромагнитной волны тоже необходимо создать начальное возмущение полей, чего можно добиться, перемещая заряд с ускорением. Максвелл доказал, что *необходимым и достаточным условием излучения является движение заряда с ускорением*, причем интенсивность излучения пропорциональна квадрату ускорения.

Из уравнений Максвелла следовало, что скорость этих волн определяется универсальными постоянными, входящими в уравнения электрического и магнитного полей, а числовое значение этой ско-

рости совпадает со скоростью света, достаточно точно измеренной за 15 лет до появления теории Максвелла. Совпадение этих скоростей стало одной из причин, приведших Максвелла к выводу: свет — это электромагнитные волны.

Чтобы убедиться в достоверности теории электромагнитных полей Максвелла, надо было получить на опыте электромагнитные волны и надежно зарегистрировать их.

Это удалось сделать Генриху Герцу. С 1885 по 1889 год, уже после смерти Максвелла, Герц провел серию своих знаменитых опытов, доказавших реальность электромагнитных волн. Герц сразу стал одним из самых популярных ученых, а электромагнитное поле получило, наконец, признание.

**Интересно, что сам Герц начинал свои опыты как противник теории Максвелла. Он намеревался опровергнуть эту теорию, но, как честный ученый, в конце концов ее признал: «Маэстро Максвелл был прав — есть эти таинственные электромагнитные волны, которые мы не можем видеть невооруженным глазом. Но они там». Герцу удалось не только обнаружить волны, но и измерить скорость их распространения, а также исследовать их отражение и преломление, происходящие в соответствии с законами оптики. Герц умер в неполные 37 лет от заражения крови.**

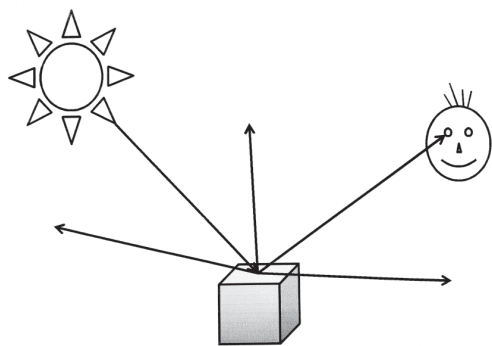
Забавно, но Герц считал, что его открытия в смысле практических приложений абсолютно бесполезны. Однако менее чем через семь лет, уже после смерти Герца, 7 мая 1895 года, Александр Степанович Попов продемонстрировал сконструированный им радиоприемник. А ещё через шесть лет Маркони провел сеанс радиосвязи через Атлантический океан, в то время как большинство ученых считали, что радиосвязь возможна только в зоне прямой видимости. Помог неизвестный тогда эффект: радиоволны достаточно низкой частоты могут отражаться от ионосферы и огибать весь земной шар. Благодаря энергии и предприимчивости Маркони за считанные годы радио вошло в жизнь людей, стало привычным. А сегодня без использования электромагнитных волн мы уже не мыслим свою жизнь.

## ГЛАВА 5. ОПТИКА

Оптика изучает процессы излучения света, его распространения и взаимодействия с веществом. Слово «оптика» в переводе с греческого — «видимое».

### ПОЧЕМУ МЫ ВИДИМ

Нам сейчас кажется достаточно очевидной идея о том, что светящиеся тела испускают нечто (свет), что, попадая в глаза, позволяет нам видеть, причем не только сами светящиеся тела, но и другие окружающие предметы. Потому что несветящиеся тела рассеивают падающий на них свет во все стороны (или зеркально отражают его), после чего рассеянный или отраженный свет попадает нам в глаза — и мы видим эти вещи (рис. 11). Черные объекты полностью поглощают свет, что делает их видимыми на фоне других объектов. Если же предмет никак не взаимодействует с падающим светом — не рассеивает, не поглощает и даже не преломляет его, то это будет абсолютный невидимка.



*Рисунок 11. Рассеяние света предметом, что делает этот объект видимым*

Удивительно, но эта идея не была очевидной древнегреческим мыслителям. Хотя в Древней Греции знали закон отражения света, имели понятие о преломлении, умели шлифовать зеркала и делать некоторые оптические приборы, но с механизмом видения греки совершенно не разобрались. Пифагорейцы выдвинули гипотезу об особом флюиде, который испускается глазами и «ощупывает» предметы сразу со всех сторон, давая их ощущение. Выражение «свет очей моих» в Древ-

ней Греции понимали совершенно буквально. И это заблуждение продержалось до начала XI века, пока его не развеял арабский ученый, известный на Западе под именем Альхазен.

Но попадание света в глаз — это только начало процесса видения. Постепенно мы разберемся, что происходит потом.

## **ПОЧЕМУ ПРЕДМЕТЫ РАЗНОЦВЕТНЫЕ**

До Ньютона было принято считать, что свет по природе своей не имеет цветности, что сам по себе он белый; цветность же — некое новое качество, которое примешивается к свету при взаимодействии с веществом.

Ньютон впервые подошел к проблеме цвета по-научному. Начал он с классического опыта. В ставне окна затемненной комнаты он проделал маленькое отверстие, через которое проходил узкий пучок солнечного света. На его пути он поставил призму, а за призмой — экран, на котором наблюдалась радужная полоска (она называется спектром). Этот опыт делали и до него. Но предшественники Ньютона полагали, что цвет появляется при воздействии вещества призмы на чистый белый свет. Ньютон же сделал иной вывод: белый свет состоит из цветных лучей, которые по-разному преломляются в призме, создавая спектр. То есть именно белый свет является сложным, составным светом.

Чтобы доказать этот тезис, Ньютон продолжил эксперимент. В экране, на котором наблюдался спектр, он проделал маленькое отверстие, через которое проходил свет только одного цвета (такой свет называют монохроматическим). На пути этого пучка Ньютон ставил новую призму и убеждался, что монохроматический пучок отклоняется призмой как целое, не меняя окраску. Он убедился также, что при смешении монохроматических лучей в определенной пропорции снова получается белый свет.

Итак, цвет является, так сказать, изначальным свойством света.

Ньютон также знал, что наше ощущение того или иного цвета не тождественно монохроматичности света. Можно, смешивая, например, красный и зеленый свет, получить желтый, который глаз не отличит от спектрального желтого, но который при прохождении через призму расщепится на красный и зеленый. А если из полного спектра удалить один цвет (например, красный), то смесь света остав-

шихся цветов мы воспримем как дополнительный цвет (дополнительный красному – зеленый).

К слову, звуки мы воспринимаем иначе: при смешивании звуков с разными высотами тона мы слышим аккорд, а не звук какого-то нового тона.

Так почему же белый свет, отразившись или пройдя сквозь вещество, «окрашивается»? Оказывается, дело в избирательном поглощении света веществом: некоторые спектральные цвета вещество поглощает – и в отраженном или прошедшем (если предмет прозрачный) свете их нет. Поэтому мы видим предмет окрашенным в тот цвет, который дает смесь отраженных (или прошедших насквозь) монохроматических лучей. Цвета тел, как правило, немонахроматичны.

## **ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ**

До начала XIX века физики полагали, что для объяснения всех оптических явлений достаточно четырех основных законов, которые называют законами геометрической оптики. Перечислим эти законы:

1. В прозрачной однородной среде свет распространяется прямолинейно. На это указывают резкие контуры теней, образующихся при освещении предметов точечными (очень маленькими) источниками.

2. Принцип независимости световых пучков: пересечение световых пучков не влияет на их дальнейшее распространение. (Вспомните, как пересекаются в небе лучи прожекторов, словно проходя друг сквозь друга.)

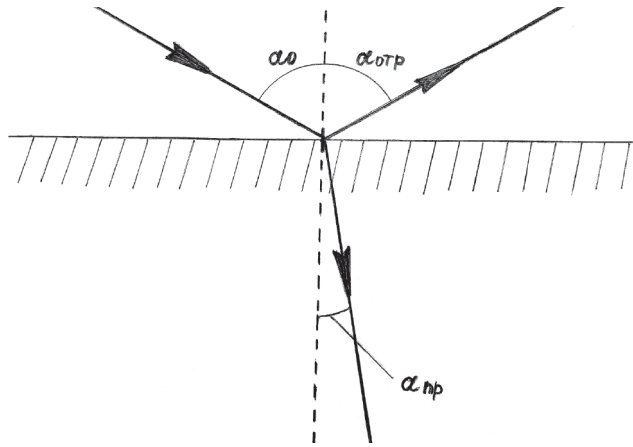
3 и 4. На границе раздела двух сред свет частично отражается, частично преломляется. При этом выполняются законы отражения и преломления.

Первые три закона установил на основе опыта еще Альхазен в начале XI века. Закон же преломления «задержался» до 1621 года из-за того, что тригонометрические функции еще не были освоены арабскими и европейскими учеными.

### **Законы отражения и преломления.**

**Падающий луч, отраженный луч и нормаль к границе, восстановленная в точке падения, лежат в одной плоскости. В этой же плоскости лежит и преломленный луч. Угол**

падения равен углу отражения:  $\alpha_0 = \alpha_{отр}$ . Углы падения ( $\alpha_0$ ) и преломления ( $\alpha_{пр}$ ) связаны законом синусов:



$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_{пр}} = \frac{n_2}{n_1}$$

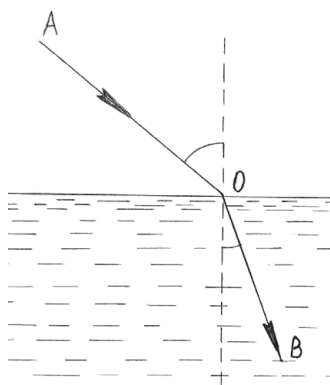
где  $n_1$  и  $n_2$  — так называемые показатели преломления двух сред. Обычно чем плотнее среда, тем больше ее показатель преломления. Для разных простых цветов показатели преломления немного различаются, поэтому фиолетовый свет преломляется в призме сильнее красного — из-за этого-то и возникает разложение белого света в спектр при прохождении луча через призму.

В 1650 году итальянский ученый Ферма́ предложил следующее утверждение (*принцип Ферма*), из которого можно получить законы прямолинейного распространения света, отражения и преломления: *свет распространяется из одной точки в другую по пути, которому соответствует минимальное время.*

Позднее было уточнено: не обязательно минимальное, но *экстремальное* время (минимальное или максимальное). Принцип Ферма называют также *принципом экстремального времени*.

**Преломление света на границе раздела сред возникает из-за того, что скорости света в разных средах разные, а показатель преломления среды  $n$  показывает, во сколько**

раз скорость света в этой среде меньше, чем в вакууме. Проведем аналогию. Представьте, что вам надо как можно быстрее попасть из точки А на берегу пруда в точку В на воде. Поскольку бегаєте вы быстрее, чем плаваете, выгоднее перемещаться не по прямой АВ, а по ломаной АОВ, чтобы пробежать большее расстояние по берегу и меньшее — по воде. Свет выбирает свою траекторию по такому же принципу.



Законов геометрической оптики достаточно для объяснения простых оптических явлений: возникновения теней и полутеней, получения изображений в оптических приборах.

## ЯВЛЕНИЕ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Иногда свет отражается от границы раздела двух прозрачных сред полностью, как если бы это было идеальное зеркало. Такое происходит, когда свет падает под достаточно большим углом к нормали из среды с меньшим показателем преломления на среду с большим показателем преломления, например, из стекла на границу с воздухом. Для каждой пары сред есть свой предельный угол полного отражения. Так, для границы «стекло — воздух» он составляет примерно  $42^\circ$ , а для границы «вода — воздух» —  $49^\circ$ . При углах падения, превышающих предельный угол, свет полностью отражается. Это и есть явление полного внутреннего отражения.

**Невозможность отражения при достаточно больших углах падения света на границу со средой, имеющей меньший**

показатель преломления ( $n_2 < n_1$ ), следует из закона преломления. В самом деле синус угла преломления  $\alpha_{\text{пр}}$  не может превышать единицу:

$$\sin \alpha_{\text{пр}} = \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha_0 < 1,$$

поэтому при углах падения  $\alpha_0$  таких, что  $\sin \alpha_0 \geq n_2/n_1$ , преломление невозможно, и весь свет отражается.

Начиная с 1950-х годов бурно развивается *волоконная оптика* — технология передачи света по тонким нитям из прозрачного пластика или стекла. Волоконный световод — это тончайшая гибкая нить, заключенная в оболочку с меньшим показателем преломления. Свет, проходя по нити, испытывает полное отражение от оболочки и распространяется дальше (рис. 12). Из множества таких нитей собирают кабели. Они используются как для распространения света, так и для передачи электронной информации. Волоконные кабели — это кабельное телевидение и интернет, закрытые линии связи, локальные вычислительные сети, медицинское оборудование и многое другое.

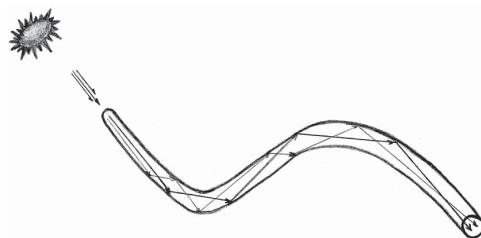


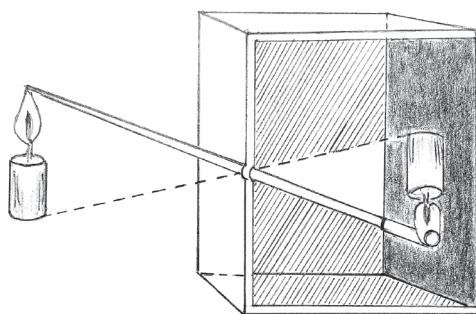
Рисунок 12. Схема волоконного световода

## ЛИНЗА — ЧУДЕСНОЕ ИЗОБРЕТЕНИЕ ПРИРОДЫ И ЧЕЛОВЕКА

Чудо видения окружающего мира стало возможным благодаря удивительному изобретению природы — линзе.

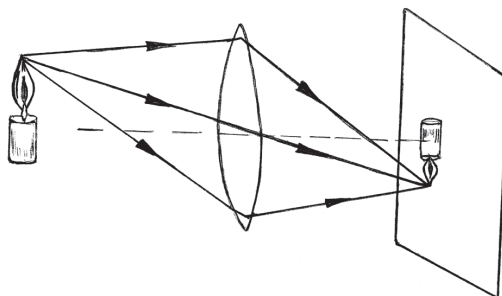
Представьте, что вы вынесли на свет фотопластинку. Она просто засветилась, и на ней ничего не отобразилось, кроме факта наличия света. Что ж, наличие света — это тоже информация. Дождевому червяку ее хватает — у него зрительные клетки расположены по всей поверхности тела, что позволяет ему отличать свет от тьмы.

Простейшее устройство для получения изображения, повторяющего форму и цвет источника, — это камера-обскура: непрозрачный ящик с отверстием в одной из стенок (в переводе с латыни «камера-обскура» означает «темная комната»). На противоположной стенке камеры получается перевернутое изображение объекта (рис. 13). Такое устройство было известно древним грекам и китайцам. Леонардо да Винчи использовал камеру-обскуру для зарисовок с натуры. Природа снабдила некоторых моллюсков глазами, работающими по принципу таких камер.



*Рисунок 13. Схема работы камеры-обскуры*

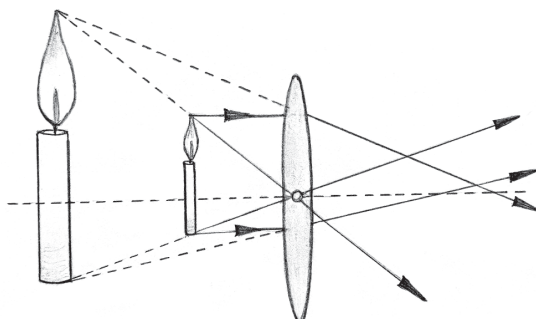
Гениальное изобретение — линза: прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Линза создает изображение путем преломления лучей: лучи, вышедшие из одной точки предмета, после преломления пересекаются в одной точке изображения. Это изображение можно увидеть на экране (такое изображение называют действительным) (рис. 14).



*Рисунок 14. Схема работы линзы*

Площадь линзы гораздо больше площади отверстия в камере-обскуре, так что света через линзу проходит гораздо больше и изображение получается ярче. Когда мы получаем изображение солнца с помощью лупы, оно такое яркое, что прожигает дерево. Уже в Древней Греции умели использовать выпуклое стекло для разжигания огня.

**В конце XIII века в Европе вошли в употребление очки «для старых» (выпуклые стекла), которые поначалу были очень дорогими и даже упоминались в завещаниях. Изобретение очков было, вероятно, случайным достижением мастеров-стекольщиков — ведь средневековые ученые не знали закона преломления и даже склонялись к мнению, что преломление — это обман зрения. Позже научились делать и «очки для молодых» (выпукло-вогнутые стекла) против близорукости, и тоже, скорее всего, случайно.**



Иногда пересекаются не сами лучи, вышедшие из одной точки предмета (на рисунке — из верхушки пламени), а их продолжения. Тогда изображение называют мнимым. Его нельзя увидеть на экране, но глаз прекрасно видит мнимое изображение — ему всё равно, на самом деле лучи вышли из одной точки или только кажутся исходящими из нее. Когда мы рассматриваем предмет через лупу, мы видим его увеличенное мнимое изображение.

Природа, создавая органы зрения, эволюционировала от камеры-обскуры к линзе. Линзами в наших глазах являются и выпуклая ро-

говица, и хрусталик, и шаровое стекловидное тело глаза. Основное преломление происходит на роговице. Зато хрусталик умеет менять свою форму, обеспечивая настройку глаза на разные расстояния (аккомодацию). Радужная оболочка служит диафрагмой, ограничивая диаметр отверстия-зрачка: в темноте зрачок увеличивается, пропуская через хрусталик больше света, на свету — сужается.

На сетчатке глаза, как на фотопластинке фотоаппарата, получается действительное изображение окружающих объектов. Ну а то, что изображение получается перевернутое, нам не страшно: мозг привык учитывать это обстоятельство.

**Американский психолог Джордж Стрэттон в 1896 году изготовил специальные очки, переворачивающие изображение, так что на сетчатке глаза изображение окружающих объектов оказывалось прямым. При этом человек видел окружающий мир «вверх ногами». Но через три дня мозг приспособился к «перевернутому» миру, и человек снова видел его нормальным. После снятия этих очков мир снова «переворачивался» на некоторое время.**

Линзы — главная часть практически всех оптических приборов: микроскопов, телескопов, фотоаппаратов, видеокамер и прочая, и прочая...

## **ЧТО ПРОИСХОДИТ НА СЕТЧАТКЕ ГЛАЗА**

Пройдя через прозрачные части глаза — роговицу, хрусталик и стекловидное тело, свет попадает на сетчатку — внутреннюю оболочку глаза, состоящую из светочувствительных рецепторов. Клетки-рецепторы делятся на два вида: колбочки и палочки. Они преобразуют видимый свет в электромагнитные импульсы, которые передаются по зрительному нерву в головной мозг.

Палочки (их 130 миллионов!) способны воспринимать свет очень малой интенсивности, но они не различают цвета, поэтому в темноте «все кошки серы». Колбочки (их 7 миллионов) чувствительны к цветам, но они работают только при ярком свете.

Распределение рецепторов на оболочке неравномерно: в центральной части преобладают колбочки, а палочек очень мало; к периферии сетчатки, наоборот, число колбочек быстро уменьшается, и остаются

одни только палочки. В центральной части к большинству колбочек подходят отдельные волокна зрительного нерва; ближе к периферии одно волокно зрительного нерва обслуживает целые группы колбочек или палочек. Поэтому различать тонкие детали мы можем, только когда прямо смотрим на предмет. Периферическая часть сетчатки служит для ориентирования в пространстве.

В палочках и колбочках находятся особые пигменты. Восприятие света и цвета обусловлено химическими реакциями в них. Особенности цветовосприятия связаны с тем, что есть колбочки трех типов, проявляющих наибольшую чувствительность к трем основным цветам спектра: красно-оранжевому, зеленому и синему. Комбинации возбуждений этих приемников разных цветов создают ощущения всей гаммы цветовых оттенков.

Именно поэтому мы можем создать ощущение любого цвета, смешивая чистые спектральные цвета — красный, зеленый, синий — и варьируя их интенсивность. Чем и пользуемся в технологиях цветной фотографии и цветного телевидения.

**В случае отсутствия одного или двух типов зрительного пигмента цветовое зрение нарушается. Впервые нарушение цветового зрения было обнаружено у известного химика Джона Дальтона: он не воспринимал красный цвет. Этот дефект зрения стали называть дальтонизмом. Есть три типа дальтоников: «краснослепые», «синеслепые» и «зеленослепые». Дальтонизм обусловлен изменением в мужской хромосоме и встречается у 5–8% мужчин и лишь у 0,4% женщин.**

## **ЧТО ТАКОЕ СВЕТ**

Ньютон полагал, что всё в природе, включая свет, состоит из мельчайших частиц (корпускул). Главным аргументом для него была прямолинейность световых лучей. К тому же его манила идея объяснить всё мироздание на основе законов механики, которые он считал универсальными и применимыми к любым частицам. И действительно, некоторые законы оптики — прямолинейное распространение в однородной среде, отражение и преломление на границе двух сред — ему удалось объяснить на основе корпускулярной гипотезы о природе све-

та. А различные спектрально чистые цвета, как он полагал, связаны с различными массами световых корпускул. Правда, с принципом независимости световых пучков корпускулярная гипотеза света сочеталась плохо.

Старший современник Ньютона, итальянский ученый-иезуит Франческо-Мария Гримальди, впервые обнаружил, что свет не всегда распространяется прямолинейно: он может попадать в область, где должна быть тень. Так, заметил он, солнечный луч, прошедший через крохотную дырочку в ставне, создает на стене световое пятно немного увеличенного размера, к тому же окрашенное по краям. Это явление Гримальди назвал дифракцией (*от лат. diffractus* – «разломленный»). Способность огибать препятствия свойственна волнам, поэтому Гримальди предположил, что свет есть некая материя, волнообразно распространяющаяся в пространстве.

Так во второй половине XVII века практически одновременно возникли две противоположные гипотезы о природе света: корпускулярная и волновая. Обе гипотезы объясняли некоторые законы геометрической оптики, при этом волновой гипотезе был «не по зубам» закон прямолинейного распространения света, а корпускулярной – принцип независимости световых пучков. Что касается дифракции, то Ньютон объяснял это явление так: из-за притяжения между краями отверстия и частицами света последние отклоняются от прямолинейного пути и заходят в область геометрической тени.

Корпускулярная и волновая гипотезы конкурировали друг с другом вплоть до начала XIX века, причем предпочтение отдавалось корпускулярной – как дань авторитету Ньютона.

Что касается скорости света, то впервые ее удалось измерить, хотя и довольно грубо, в 1676 году, по наблюдениям за Юпитером и его спутником Ио. А в лабораторных условиях ее смогли измерить лишь в середине XIX века.

## **РОЖДЕНИЕ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ**

Начало XIX века принесло оптике новые открытия. Революция в оптике практически совпала с революцией в электродинамике.

В 1800 году, когда Вольта сделал свою электрическую батарею, англичанин Томас Юнг «воскресил» идею световых волн.

Но ведь волны должны быть «на чем-нибудь», а что есть в пустоте? Юнг полагал (как в свое время Аристотель), что пустота заполнена невесомым эфиром, в котором и возбуждаются волновые движения. А цвет он связал с частотой колебаний частиц эфира в волне: каждому чистому цвету соответствует своя частота колебаний. Через 65 лет, когда появилась на свет теория электромагнитных полей Максвелла, стало ясно, что пустота заполнена полями, а свет (как и радиоволны) — это волновые возмущения этих полей.

**Любые волновые процессы — звук, свет и прочие — характеризуются тремя основными параметрами: скоростью распространения  $c$ , частотой колебаний  $\nu$  и длиной волны  $\lambda$  — расстоянием, которое волна проходит за время, равное периоду колебаний. Эти параметры связаны уравнением:  $\lambda = c/\nu$ . Чем больше частота колебаний, тем короче волна. Для видимого света длина волны (в вакууме) меняется от 400 нм (фиолетовый свет) до 750 нм (красный). Именно в этом диапазоне длин волн Солнце излучает с максимальной интенсивностью.**

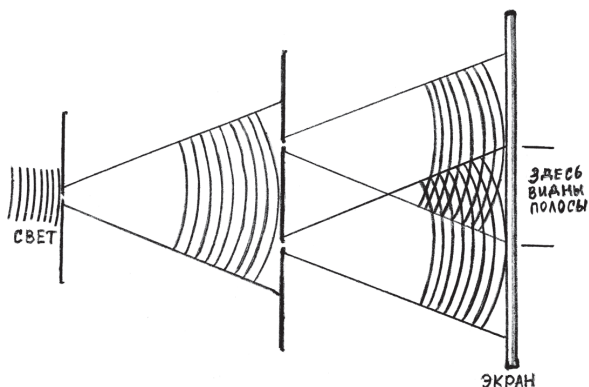
Юнг не просто рассуждал о волновой природе света. Он доказал это экспериментально и измерил длины световых волн разного цвета. Главное отличительное свойство любых волн — их способность «проходить друг сквозь друга», не мешая дальнейшему распространению (тот самый принцип независимости световых пучков). В каждой точке области перекрытия волн колебания, возбуждаемые ими, просто складываются. Если волны при этом имеют одинаковые частоты (строго говоря, если волны когерентны), то в одних местах суммарная интенсивность колебаний возрастает (там, где гребни двух волн совпадают), а в других местах волны гасят друг друга (там, где гребень одной волны накладывается на впадину другой). Такое перераспределение энергии волн в пространстве Юнг назвал **интерференцией**.

Проще всего увидеть интерференцию волн на поверхности воды.

**Условие когерентности волн — это не только равные частоты колебаний. Источники этих волн должны совершать колебания в фазе — в идеале они должны быть совершенно идентичными. Парные отверстия в схеме Юнга как раз**

**являются такими идентичными источниками волн — ведь они являются производными одной и той же исходной волны.**

Для наблюдения интерференции света Юнг поставил простой и красивый опыт. В качестве точечного источника света он использовал маленькую дырочку в оконной ставне, которую он покрыл листом бумаги, проколотой тонкой иглой. Свет, выходящий из отверстия в бумаге, освещал второй лист бумаги, в котором кончиком булавки были сделаны два отверстия близко друг к другу. В области перекрытия выходящих из пары отверстий световых пучков на приемном экране наблюдались светлые и темные интерференционные полосы (рис. 15). Когда закрывалось одно из отверстий, полосы исчезали.



*Рисунок 15. Схема опыта Юнга*

Измеряя ширину интерференционных полос, Юнг смог вычислить длину волны света. Она оказалась очень мала: в половине миллиметра укладывается тысяча длин волн зеленого света. Именно из-за малости длин световых волн их волновые свойства — интерференцию и дифракцию — так трудно наблюдать: требуются очень малые отверстия или преграды.

Результаты своих исследований световых волн Юнг опубликовал и доложил на ученом заседании Лондонского королевского общества. Но резонанса его работа не получила. Надо сказать, что к началу XIX века центр научной мысли переместился из Лондона в Париж, и вряд ли кто из французских коллег прочитал статью Юнга на английском.

Новое рождение волновая оптика получила 17 лет спустя благодаря французскому инженеру Огюстену Френелю.

## **ТЕОРИЯ ДИФРАКЦИИ ФРЕНЕЛЯ**

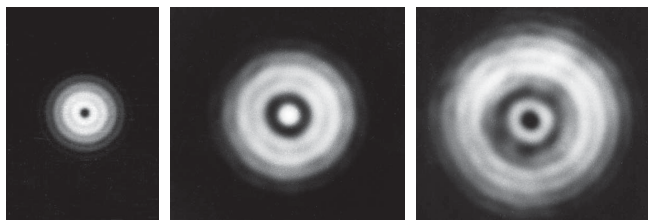
Когда волна встречает препятствие, сопоставимое по размеру с длиной волны, она отклоняется от прямолинейного распространения, огибает препятствие и проникает в область геометрической тени. Это явление и называют дифракцией. Дифракция присуща волнам любой природы. Например, морские волны огибают скалу, стоящую у них на пути.

В начале 1817 года Французская академия наук объявила конкурс на лучшую работу по дифракции света, причем подразумевалось, что это явление будет рассматриваться на основе корпускулярной теории света как результат притяжения световых корпускул к молекулам огибаемого тела. Молодой инженер Френель прислал свою работу, в которой показал, что корпускулярная теория света не в состоянии объяснить явление дифракции. Притяжение света к молекулам тут ни при чем — вещество преграды не играет никакой роли. Зато волновая теория позволила ему объяснить и предсказать самые разные дифракционные явления.

**Огюстен Френель (1788–1827), инженер, ставший впоследствии знаменитым физиком, заинтересовался оптикой в 1814 году случайно, когда по роду службы вынужден был заняться реорганизацией маячного освещения. Не зная работы Юнга, он повторил его выводы об интерференции света и пошел дальше. За неполные девять лет работы Френель совершил полный переворот в оптике. Он умер в возрасте всего 39 лет. Не сразу, но ещё при жизни Френеля его волновая теория света получила признание.**

На пальцах суть дифракции можно объяснить так. От каждой точки источника свет приходит в точку наблюдения по множеству различных путей, и волны, прошедшие разными путями, имеют в точке наблюдения разные фазы. В одних точках происходит взаимное усиление волн, в других — взаимное погашение. Френель придумал, как предсказать результат дифракции в ряде простых ситуаций.

Пусть, к примеру, свет проходит через маленькое круглое отверстие в непрозрачной ширме. На экране, установленном за ширмой, будет не просто круглое светлое пятнышко, а дифракционная картина, состоящая из чередующихся темных и светлых колец. Причем в центре картины может быть как темное, так и светлое пятно, в зависимости от радиуса отверстия и расстояния до экрана (рис. 16). Френель разработал метод расчета, позволяющий предсказать, что же именно окажется в центре картины.



*Рисунок 16. Дифракция на круглом отверстии*

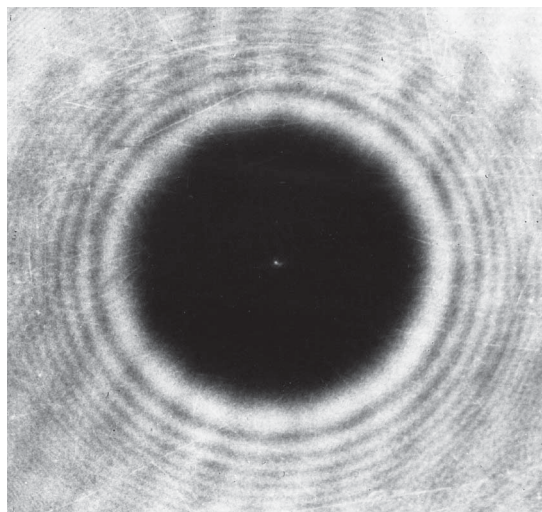
Применив свой метод к случаю дифракции на краю плоского экрана, он объяснил периодические изменения интенсивности света по мере того как свет удаляется от края геометрической тени. На фотографии (рис. 17) вы видите на краю тени от перьевой ручки сначала светлый ореол, а затем чередующиеся темные и светлые полосы.



*Рисунок 17. Дифракция на краю стального пера*

Работы, представленные на конкурс, рассматривала специальная комиссия Академии наук, в составе которой были крупнейшие ученые того времени. Все они придерживались традиционных взглядов на

природу света и отнесли к работе Френеля с недоверием. Однако совпадение расчетов Френеля с опытными данными было настолько хорошим, что комиссия была вынуждена присудить ему премию. При этом произошел интересный случай. Член комиссии математик Пуассон заметил, что метод Френеля приводит к парадоксальному выводу: в центре тени от шарика должно быть светлое пятно, однако этого до сих пор никто не наблюдал. Из теории Френеля следовало, что светлое пятно будет заметно только в том случае, если радиус шарика будет достаточно малым. Это предсказание вскоре было проверено на опыте, превратив таким образом возражение Пуассона в убедительнейшее доказательство справедливости теории Френеля (рис. 18).



*Рисунок 18. Пятно Пуассона*

Вы можете наблюдать дифракцию без всяких специальных приспособлений, просто глядя на солнце или яркую лампу сквозь ресницы. Вы увидите радужную окраску — результат дифракции на ресницах. Или посмотрите на свет, отраженный от компакт-диска, — он тоже выглядит радужным, потому что происходит дифракция на множестве узких бороздок. При отражении лампы в пыльном зеркале виден цветной ореол вокруг нее из-за дифракции на множестве пылинок.

Принцип экстремального времени, постулированный Ферма, Френель тоже объяснил с волновой точки зрения. Он создал также теорию поляризации света. За короткое время им по существу была пол-

ностью создана классическая волновая оптика. И если Ампера Максвелл назвал «Ньютоном электричества», то Френель заслуживает титула «Ньютон волновой оптики».

Итак, Френель убедительно доказал, что свет — это волны. Максвелл затем уточнил: это электромагнитные волны. Казалось бы, вопрос решен. Однако начало XX века принесло неожиданные сюрпризы в вопросе о природе света. Мы поговорим о них в следующей части книги.

## ИСТОЧНИКИ СВЕТА. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Откуда берется свет?

Издrevле известно, что нагретые тела светятся, причем чем выше температура, тем свечение ярче. Когда не было бесконтактных термометров, металлурги определяли температуру раскаленного металла по цвету каления, который при нагревании постепенно меняется от темно-красного (при температуре 550 °C) до ярко-белого (выше 1300 °C). Температура вольфрамовой нити лампы накаливания — около 2000 °C (чем больше мощность лампы, тем выше температура нити).

Свечение нагретых тел — это пример *теплового излучения*. Энергия на это излучение заимствуется из тепловой энергии тела, так что при отсутствии подвода тепла излучающее тело будет остывать.

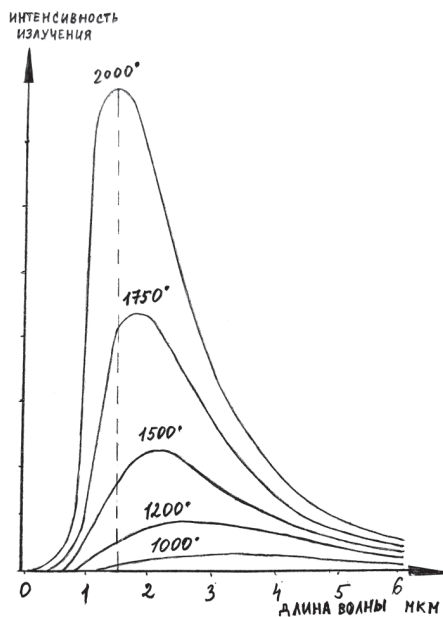
Абсолютно все тела являются источниками теплового излучения. Если тело недостаточно горячее, оно излучает электромагнитные волны в невидимом инфракрасном диапазоне (длина волны для этого диапазона больше 750 нм). Инфракрасное излучение мы ощущаем кожей как тепло. Мощность теплового излучения тела человека — около 100 Вт.

В XIX веке были исследованы законы теплового излучения. Тепловое излучение имеет непрерывный спектр, то есть в нем присутствуют все длины волн от нуля до бесконечности. Но основная мощность излучается вблизи определенной, наивероятнейшей длины волны, которая обратно пропорциональна абсолютной температуре (*закон смещения Вина*). Поэтому очень горячие звезды — голубые, при температуре поверхности около 6000 К — желтые (как наше Солнце), а ещё более холодные — красные.

Полная мощность излучения тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры (*закон Стефана – Больцмана*). Так, если

абсолютная температура увеличится в два раза, мощность излучения возрастет в 16 раз.

Спектр излучения (зависимость интенсивности излучения от длины волны) имеет характерный вид «горба». Длину волны, на которую приходится максимум излучения, можно рассчитать по формуле:  $\lambda = b/T$ , где  $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$  м/К — постоянная Вина. Рабочая температура нити лампы накаливания бывает от 2200 до 2900 К, и максимум излучения приходится на длину волны около 1000 нм (инфракрасное излучение). В видимом диапазоне лампа накаливания излучает всего лишь около 2% от полной мощности. Практически вся мощность приходится на инфракрасный диапазон. Так что лампа накаливания не столько светит, сколько греет. Ее достоинство — непрерывный спектр, который наиболее комфортен для глаза. При температурах от 4000 до 7000 К максимум излучения лежит в видимом диапазоне. А чтобы мощность теплового излучения, приходящаяся на весь видимый диапазон, была максимальной, нужна температура около 6000 К, как на поверхности Солнца.



Что касается объяснения этих законов теплового излучения, то тут классическая физика потерпела полное фиаско. Собственно, становление новой, квантовой, физики началось именно с попытки теоретически обосновать законы теплового излучения. И произошло это в самом начале XX века.

## НЕТЕПЛОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

В середине XIX века были изобретены газоразрядные трубки. Если через трубку с разреженным газом пропускать электрический ток (этот процесс называют газовым разрядом), то газ светится. Для каждого газа характерен свой цвет свечения: для неона – оранжево-красный, для паров ртути – сине-фиолетовый... Разноцветные огни рекламы – это в основном газоразрядные трубки, наполненные различными газами.

Газ в таких трубках нагревается очень слабо, то есть это не тепловое излучение, и в спектре такого излучения присутствуют не все длины волн. Атомарные газы излучают лишь несколько избранных длин волн, для каждого газа – своих, поэтому при разложении излучения в спектр с помощью призмы мы увидим отдельные линии – такие спектры называют линейчатými. После 1938 года для освещения общественных зданий стали применять люминесцентные лампы (их еще называли лампами дневного света). В длинную трубку закачивали пары ртути и аргон, а на внутреннюю поверхность трубки наносили специальное вещество – люминофор. Пары ртути испускают невидимое ультрафиолетовое излучение, которое люминофор поглощает, а затем излучает уже собственные длины волн в видимом диапазоне. Это явление называется *фотолюминесценцией*. Люминофор подбирают такой, чтобы выходящий из лампы свет казался белым.

В конце 1980-х годов на мировом рынке распространились компактные люминесцентные лампы (в нашей стране их называют энергосберегающими). Принцип излучения тот же, только форма трубки спиралевидная. Один из существенных недостатков всех люминесцентных ламп – линейчатость их спектра, вызывающая зрительное утомление. Зато они гораздо экономичнее: лампа мощностью 11 Вт создает такое же освещение, как 75-ваттная лампа накаливания.

Почему атомы одноатомных газов излучают лишь строго определенные длины волн? На этот вопрос смогла ответить только квантовая физика.

С конца 1990-х на смену люминесцентным лампам пришли светодиодные. Светодиод — это крохотный кристалл полупроводника, в который внесены определенные примеси, так что в одной части кристалла появляются свободные электроны, не участвующие в образовании валентных связей, а в другой части — так называемые дырки — незаполненные валентные связи. При пропускании тока электроны «заполняют» дырки, и при этом излучается свет в определенном диапазоне длин волн. Для понимания работы светодиода опять-таки нужна квантовая физика.

**Во второй половине XX века появились совершенно уникальные квантовые генераторы света — лазеры. Современные лазеры генерируют монохроматическое излучение практически любой длины волны. Лазерные пучки могут быть очень узкими и необычайно мощными; излучение может генерироваться непрерывно, а может сверхкороткими импульсами; лазерный луч используют в качестве медицинского инструмента, а также оружия. И совершенно незаменимы лазеры в научных исследованиях. Лазеры стали одним из самых значимых изобретений XX века.**

Резюмируя, можно сказать: классическая физика не смогла объяснить особенности излучения света различными источниками.

## **КАРТИНА МИРА КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

К концу XIX века физика добилась огромных успехов: завершены механика и электродинамика, включая волновую оптику, успешно развивались молекулярная физика и термодинамика. Физику, сформировавшуюся к началу XX века, принято называть **классической**. За два с лишним столетия ее ошеломительных успехов сложилось убеждение, что это абсолютно истинная и единственно верная научная теория, не имеющая границ применимости. Казалось, что на ее основе можно объяснить все явления природы.

Попробуем широкими мазками описать картину мира глазами классической физики.

В природе существуют две принципиально разные формы материи — частицы (электроны и атомы) и электромагнитное поле. Частицы дискретны, а поле непрерывно и заполняет все пространство. Заряженные частицы порождают поле, а поле воздействует на частицы. Электромагнитное поле всё время изменяется, а частицы (электроны и атомы) вечны и неизменны. Как видим, уже в самой основе этой картины заложена **двойственность**: частицы и поля, хотя и взаимодействуют между собой, выступают как носители принципиально различных свойств.

Движение всех частиц однозначно и точно может быть предсказано на основе законов Ньютона и знания законов взаимодействия частиц и действия на них полей. Состояние и эволюция поля также однозначно и точно предсказываются на основе уравнений Максвелла. Другими словами, весь мир классической физики принципиально предсказуем, то есть **детерминирован**. В принципе, обладая полным знанием о состоянии всех частиц и полей в один какой-то момент времени, можно однозначно предсказать состояние Вселенной в любой другой момент как в будущем, так и в прошлом.

Что касается пространства и времени, то до 1905 года, в рамках чисто классической физики, они представлялись существующими независимо друг от друга и от материи. Однако теории относительности Эйнштейна (специальная и общая) показали, что пространство и время связаны в «один узел», а также связаны с материей, которая определяет и кривизну пространства, и ход времени. Но однозначность и точность предсказаний, то есть детерминизм, теории относительности не отменили!

Лишь квантовая физика, родившаяся на рубеже XIX–XX веков, освободила нас от груза детерминизма и сделала мир совершенно невероятным и непредсказуемым — можно сказать, подарила нам свободу воли.

**В конце XIX века молодой аспирант Макс Планк, будущий основатель квантовой физики, пришел к своему профессору Филиппу Жолли и сказал, что хочет заниматься теоретической физикой. Тот ему ответил: «Молодой человек, зачем вы хотите испортить себе жизнь — ведь теоретическая**

*физика уже в основном закончена. Стоит ли браться за такое бесперспективное дело?»* А в апреле 1900 года 76-летний «патриарх» физики лорд Кельвин (Уильям Томсон) прочитал в Лондонском королевском институте лекцию «Тучи XIX века над теорией теплоты и света», в которой указал на некоторые проблемы классической физики и заключил, что «проще всего не обращать внимания на существование этих туч». Через несколько лет одна из кельвиновских «туч» привела к созданию теории относительности Эйнштейна. А другая «туча» стала толчком к рождению квантовой физики. Уже в декабре 1900 года, через несколько месяцев после лекции лорда Кельвина, Макс Планк, пытаясь разобраться с законами теплового излучения, выдвинул первые квантовые гипотезы. Так родилась квантовая физика.

# ЧАСТЬ 3.

## ФИЗИКА МИКРОМИРА

*В начале XX века начало складываться понимание, что Вселенная, хотя по сути своей и едина, имеет несколько структурно-иерархических уровней организации материи, и макромир – мир человека и ближайший космос, подчиняющиеся законам классической физики, – лишь один из них.*

*К поведению микрочастиц в очень малых областях пространства (меньше или порядка размера атома) законы классической физики оказались неприменимы – это царство квантовой физики.*

*Квантовая теория развивалась постепенно, начиная с 1900 года, благодаря трудам многих людей: Планка, Эйнштейна, Бора, де Бройля, Дирака, Паули и других. Были открыты совершенно неожиданные, даже непредставимые для нас, свойства объектов микромира и законы, ими управляющие. Атом лишился статуса вечного и неделимого, квантовая теория разобралась в его устройстве. Было открыто множество субатомных частиц – сначала в космических лучах, а потом с помощью ускорителей.*

*Квантовая электродинамика смогла ответить на вопрос: что же собой представляет электромагнитное поле, из какой материи оно состоит? Кроме того, в микромире были обнаружены два новых, неизвестных в макромире, типа физических полей – их назвали сильным и слабым.*

*Постепенно физика приближается к ответу на самые древние вопросы: из чего же всё в конечном счете сделано и как всё держится?*

# ГЛАВА 1.

## ЗАКОНЫ МИКРОМИРА

*Эта теория, несомненно, безумна, но достаточно ли она безумна, чтобы быть истинной?*

*Нильс Бор*

Проследим вкратце историю становления основных идей квантовой физики.

### КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ

Впервые квантовые идеи возникли в связи с проблемой объяснения законов теплового излучения тел.

Можно назвать точную дату зарождения квантовой физики: 14 декабря 1900 года Макс Планк на заседании Берлинского физического общества сформулировал первую квантовую гипотезу. Он показал, что все законы теплового излучения прекрасно объясняются, если допустить, что излучение происходит не непрерывно, а дискретными порциями — Планк назвал их квантами (*от лат. quantum* — «сколько»; Планк использовал термин «квант» в значении «неделимая порция»). Чем больше частота излучения (то есть чем меньше длина волны), тем больше величина кванта энергии. Коэффициент пропорциональности между квантом энергии и частотой излучения — это постоянная Планка. Со временем стало понятно, что она играет в физике такую же фундаментальную роль, как скорость света, элементарный заряд и гравитационная постоянная.

**Электромагнитное излучение частоты  $\nu$  (длины волны  $\lambda$ ) состоит из неделимых квантов энергии**

**$\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$ , где  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  Дж  $\times$  с — постоянная Планка.**

Физики не сразу оценили значимость гипотезы Планка. Это произошло лишь в 1905 году, когда Эйнштейн привлек гипотезу о квантовании энергии света для объяснения особенностей фотоэффекта. Свет может выбивать электроны с поверхности металлов — это и есть **фотоэффект**. С точки зрения волновой теории света электромагнитная волна «раскачивает» электроны в металле до тех пор, пока они не приобретут определенную энергию, достаточную для выхода из ме-

талла. Казалось бы, чем интенсивнее волна, тем быстрее она сообщит электрону необходимую энергию, а частота волны — это дело второстепенное. Но на опыте всё оказалось не так: фотоэффект вызывается волной сколь угодно малой интенсивности, главное — чтобы частота превышала определенную величину, характерную для каждого металла (так называемую «красную границу» фотоэффекта), причем электроны начинают вылетать практически мгновенно, независимо от интенсивности волны.

Эйнштейн объяснил эти «странности» фотоэффекта тем, что свет может поглощаться исключительно неделимыми порциями — теми самыми квантами энергии, которые придумал Планк. Электрон в металле может поглотить или целый квант, или ничего: кусочек энергии от кванта «отщипнуть» нельзя. Если частота излучения превышает «красную границу», поглощенной порции энергии электрону хватает для вылета из металла.

**Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта выражает энергетический «дебет и кредит», как в бухгалтерии: приход-расход энергии для электрона. Дебет — это поглощенный квант энергии  $h\nu$ , кредит — траты энергии. Чтобы покинуть металл, электрон должен затратить энергию, равную так называемой работе выхода  $A_{\text{вых.}}$ , после чего у него остается кинетическая энергия  $E_{\text{кин.}}$ . Итак:  $h\nu = A_{\text{вых.}} + E_{\text{кин.}}$ . Если же частота излучения мала:  $h\nu < A_{\text{вых.}}$ , вылет электрона невозможен, и интенсивность света (то есть количество квантов света) ничем не может помочь в этой ситуации. В 1921 году Эйнштейн получил единственную в своей жизни Нобелевскую премию — именно за объяснение явления фотоэффекта.**

Но гораздо важнее, что Эйнштейн первым поверил в реальное существование неделимой порции излучения. Раз свет излучается порциями и поглощается порциями, разумно предположить, что и во время распространения световая энергия остается разделенной на эти порции. Позднее (с 1926 года) неделимые порции электромагнитного излучения стали называть *фотонами*.

В каком-то смысле фотон можно считать частицей, обладающей самостоятельным существованием, энергией и импульсом. Но масса фотона, в отличие от обычных частиц вещества, равна нулю, поэтому фотон не может покоиться — он существует только в движении со скоростью света. Такое свойство безмассовых частиц вытекает из специальной теории относительности Эйнштейна.

Но у фотона имеются и волновые характеристики: частота и длины волны; подобно всем волнам, фотонам свойственны интерференция и дифракция. Как вообразить частицу-волну? Эйнштейн признавался, что его чуть не свели с ума размышления о том, что же такое фотон! Да, представить себе, что такое частица и одновременно волна, не может никто. В этом проявляются общая трагедия отсутствия наглядности и парадоксальность всей квантовой физики.

**Характеристики фотона как частицы (энергия  $\varepsilon$ , импульс  $p$ ) и как волны (частота  $\nu$ , длина волны  $\lambda$ ) связаны друг с другом. Формула Планка связала энергию фотона с частотой. А импульс фотона связан с длиной волны:**  
 **$p = h/\lambda$ , или  $\lambda = h/p$ .**

В 1920-е годы были поставлены различные эксперименты, подтвердившие все предсказания теории о свойствах фотонов.

Так, в XX веке неожиданным образом слились воедино волновая и корпускулярная теории о природе света. Оказалось, ни одна из них сама по себе не может объяснить всех наблюдаемых явлений. Для описания распространения света и явлений, с ним связанных (интерференция, дифракция), успешно применяется классическая волновая теория света. При описании процессов излучения света и его взаимодействия с веществом применяется корпускулярная модель.

Эта двойственность получила название *корпускулярно-волнового дуализма*. Дело в том, что волна и частица — это не что иное, как модели, основанные на нашем восприятии явлений макромира. Эти модели не способны описать полностью объекты микромира, которые попросту не имеют аналогий в нашем мире.

## ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Чаще всего рождению новых идей способствует эксперимент. Но иногда они рождаются просто из головы. В 1923 году молодой французский физик Луи де Бройль высказал идею о том, что корпускулярно-волновой дуализм, присущий свету, распространяется и на частицы вещества — электроны, протоны, атомы... Он предположил, что любой микрочастице присуща длина волны, причем связь между длиной волны  $\lambda$  и импульсом  $p$  такая же, как для фотонов:  $\lambda = h/p$ .

Физики сначала отнеслись к этой идее скептически. Эйнштейн был первым, кто ее поддержал. В одном из писем коллеге он писал об этой идее: «...даже если она выглядит безумной, она всё же совершенно самобытна».

Подтверждением волновых свойств чего бы то ни было служат явления интерференции и дифракции. Способны ли микрочастицы интерферировать, как волны? Американские физики Дэвиссон и Джермер не слышали о «безумной» идее де Бройля и не собирались ее проверять. Но в своих опытах 1927 года по отражению электронного пучка от поверхности монокристалла они натолкнулись на типичную дифракционную картину. Они измерили длину волны электрона в зависимости от его импульса и подтвердили предсказание де Бройля. Позднее дифракцию на кристаллах наблюдали также у нейтронов, протонов, у атомных и молекулярных пучков.

**Дебройлевская длина волны даже у медленных электронов очень мала — в десятки и сотни раз меньше длины волны видимого света (по длине волны такие электроны соответствуют рентгеновскому излучению). Поэтому использовать для наблюдения интерференции и дифракции те же способы, что в оптике, здесь нельзя. Зато кристаллы с их периодической структурой прекрасно служат трехмерными дифракционными решетками для электронов. Самые же быстрые электроны, получаемые на ускорителях, имеют рекордно малые длины волн —  $10^{-17}$  м. Они используются для изучения внутренней структуры атомных ядер.**

Итак, всем микрообъектам присущ корпускулярно-волновой дуализм, однако они не являются ни волнами, ни частицами в классическом понимании. Корпускулярные и волновые свойства микрообъектов не проявляются одновременно, в одних и тех же явлениях они дополняют друг друга, и только их совокупность характеризует микрообъект полностью. В этом суть сформулированного Нильсом Бором *принципа дополнительности*.

В дальнейшем мы будем продолжать употреблять привычное слово «частица» применительно к электрону и другим объектам микромира (у нас нет другого подходящего слова в языке), но не будем забывать, что это не просто частица, но частица-волна.

## ПРОХОЖДЕНИЕ ЧЕРЕЗ ДВЕ ЩЕЛИ

Вопрос о том, как в одном объекте совмещаются свойства частицы и волны, ещё долго волновал физиков. Выдвигалась гипотеза: возможно, наблюдаемая в экспериментах с электронами дифракционная картина обусловлена одновременным участием в процессе большого числа частиц, а отдельный электрон, проходя сквозь ту же установку, не будет обнаруживать дифракции?

Чтобы прояснить этот вопрос, российские физики под руководством В.А. Фабриканта осуществили в 1949 году опыт, в котором интенсивность электронного пучка была настолько слабой, что электроны проходили через прибор практически поодиночке. Однако при достаточно длинной экспозиции была получена дифракционная картина, ничем не отличающаяся от той, которая наблюдается при большой интенсивности, но малом времени экспозиции. Так было доказано, что волновые свойства присущи каждой отдельной микрочастице.

Чтобы лучше понять, как проявляются корпускулярные и волновые свойства микрочастицы, обсудим подробнее опыт с прохождением одиночных электронов через пару щелей. В этом явлении, по выражению известного физика Ричарда Фейнмана, таится вся суть квантовой механики.

После щелей установлен экран-фотопластинка, который засвечивается в том или ином месте при попадании электронов (рис. 19).

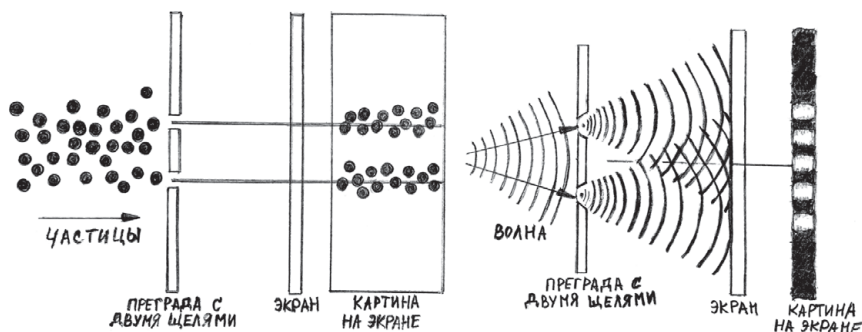


Рисунок 19. Прохождение классических частиц и волн через пару щелей: распределение интенсивности на экране для частиц (слева) и волны (справа)

Если бы через пару щелей проходили классические частицы, то они в основном попадали бы в две области экрана прямо напротив каждой из щелей: на фотопластинке появились бы две размытые полосы (размытость связана с тем, что частицы могут «срикошетить» на краях щели).

Если бы проходила классическая волна, на экране возникла бы система более узких интерференционных полос, причем посередине между щелями был бы максимум интенсивности.

Так что же будет на экране после прохождения одного электрона? Оказывается, на фотопластинке будет одно пятнышко. Однако предсказать, где именно возникнет это пятнышко, невозможно. Несколько электронов — несколько пятнышек. Когда же через щели пройдет очень много электронов, на экране из отдельных пятнышек складывается интерференционная картина из светлых и темных полос. Если закрыть одну из щелей, то интерференционные полосы исчезнут.

Возникает вопрос, через какую из щелей пролетает тот или иной электрон? Ведь нашему сознанию трудно допустить, что электрон пролетает через обе щели сразу. Можно ли его «подловить», чтобы это узнать? Если около щелей поставить устройства, фиксирующие пролет электрона (счетчики), то всегда будет срабатывать лишь одно из них. Но при этом интерференция от двух щелей исчезнет — на экране будут максимумы напротив каждой из щелей. А что если поставить только один счетчик возле одной щели? Он либо срабатывает (электрон прошел через эту щель), либо нет (значит, электрон прошел через

другую щель). Может быть, те электроны, которых он не засек, создают интерференционную картину? Но нет, интерференции на двух щелях всё равно не будет.

**Долгое время эксперимент с прохождением электронов через пару щелей описывался как мысленный, так как размер щелей должен быть уж слишком мал. Однако в 1961 году всё же удалось осуществить «опыт Юнга» с электронами и наблюдать интерференционные полосы шириной около 0,001 мм.**

Многочисленные эксперименты доказали, что никакими хитроумными способами нельзя узнать, через какую из щелей прошел электрон, не разрушая при этом интерференционную картину. Получается, что электрон-волна умудряется проходить через обе щели с последующей интерференцией только тогда, когда этого «никто не видит», а любые попытки засечь электрон возле щелей заставляют его вести себя как частица. При взаимодействии с фотопластинкой он тоже ведет себя как частица — оставляет след в одном каком-то непредсказуемом месте. Но можно предсказать *вероятность* попадания электрона в то или иное место экрана: она соответствует распределению интенсивности классической волны, прошедшей через пару щелей.

Итак, каждый электрон (точнее говоря, соответствующая ему дебройлевская волна) интерферирует «сам с собой», если ему не мешать. Кстати, если аналогичный опыт проделать с единичными фотонами, то результат будет точно таким же: один фотон — одно пятнышко, много фотонов — интерференционная картина. И опять-таки, никакими ухищрениями невозможно зарегистрировать пролет фотона сразу через обе щели.

Результаты такого рода опытов вынудили физиков *отказаться от понятия траектории при описании движения микрочастиц в очень малых областях пространства*. Например, можно говорить о траектории электрона в конденсаторе, но траектории электрона в атоме, а также при прохождении через очень узкие щели уже не существует.

Итак, эксперименты по интерференции и дифракции микрочастиц привели к следующим выводам:

- волновые свойства присущи отдельной микрочастице,

- но для обнаружения этих свойств необходимо или провести опыт с большим числом частиц, или повторить многократно эксперимент с одной частицей,
- однозначно предсказать результат единичного эксперимента с одной частицей *в принципе* невозможно. **В микромире отсутствует классический детерминизм,**
- но можно предсказать вероятность обнаружения частицы в том или ином месте.

## СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Парадоксальность поведения микрочастиц и невозможность применения к ним привычных моделей связаны с тем, что мы с ними принадлежим различным структурно-иерархическим уровням.

Как мы можем получить информацию о том, что происходит в микромире, который не дан нам в непосредственном ощущении? Только с помощью *измерения*, то есть взаимодействия микрочастицы (представителя микромира) и измерительного прибора (представителя макромира). Измерение — это способ выяснить тот или иной вопрос, сформулированный на языке макромира: ведь только на этом языке мы умеем формулировать мысли.

Например, мы пытаемся понять, через какую щель прошел электрон. В нашем повседневном опыте процесс измерения обычно не изменяет состояния объекта, поэтому мы привыкли считать наблюдателя «незримо присутствующим». В микромире всё по-другому. Чтобы определить, через какую щель прошел электрон, надо, чтобы он вступил во взаимодействие с прибором. Но в результате такого события электрон неизбежно изменит свое движение! Это похоже на то, как если бы мы пытались отследить траекторию мухи, обстреливая ее камнями. При любом измерении квантовая система изменяет свое состояние — это одно из ключевых звеньев квантово-механического мировоззрения.

В классической физике считается, что путем улучшения методик и экспериментальной техники погрешности измерения любых величин могут быть сделаны сколь угодно малыми, т. е. в принципе измерения могут быть точными.

Квантовая физика установила, что в микромире есть принципиальный предел точности при определении некоторых *par* величин. Он

не может быть преодолен совершенствованием приборов и методик измерений.

Допустим, мы хотим определить траекторию микрочастицы. Для этого надо знать ее координату в некоторый момент, а также скорость (или импульс), чтобы узнать, где она окажется в следующий момент. Но, измеряя координату частицы, мы воздействуем на нее объектом макромира (прибором) и изменяем тем самым ее импульс. Математическим выражением этого факта стало соотношение неопределенностей Гейзенберга (1927): чем точнее мы измеряем координату частицы, тем менее точно мы можем измерить ее импульс.

Но взаимосвязанные неопределенности — это не просто проблема измерений! Суть в том, что объективно не существует состояний микрочастиц с точно определенными значениями координат и импульса. Если бы они одновременно имели определенные значения (пусть даже нам неизвестные), то существовали бы определенные траектории частиц — и «фокусы» с прохождением через две щели, и дифракция стали бы невозможны!

**Соотношение неопределенностей. Неопределенность координаты  $\Delta x$  и неопределенность составляющей импульса  $\Delta p_x$  связаны неравенством:  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$ . Если при этом измерения координат  $y$  и  $z$  не производятся, то составляющие импульса  $p_y$  и  $p_z$  могут быть измерены точно.**

Из соотношения неопределенностей для координат и импульса вытекает интересное следствие: микрочастица принципиально не может находиться в покое. Ведь покоиться — значит находиться в определенной точке (координаты точно определены) и иметь нулевой (то есть определенный) импульс, что невозможно. Опыт подтверждает, что даже вблизи абсолютного нуля температур, когда по законам классической термодинамики всё тепловое движение должно прекращаться, атомы совершают так называемые нулевые колебания (образно говоря, «топчутся на месте»). Кинетическая энергия этих нулевых колебаний не позволяет, в частности, жидкому гелию и водороду замерзнуть при охлаждении до абсолютного нуля температур (чтобы «победить» энергию нулевых колебаний этих атомов, требуется не только охладить их, но и приложить высокое давление).

Помимо неопределенностей координат и импульса есть и другие пары неопределенностей. Так, чем точнее требуется измерить энергию системы, тем большее время надо затратить на измерение. Можно сформулировать по-другому, без привязки к измерению: чем меньше время существования некоторого состояния или объекта, тем больше неопределенность энергии этого состояния или объекта.

**Соотношение неопределенностей для энергии:**  
**неопределенность энергии  $\Delta E$  и время ее измерения (или существования состояния)  $\Delta t$  связаны неравенством:**  
 **$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$ .**

Последнее соотношение дает удивительную возможность нарушения закона сохранения энергии на некоторое время, а именно: энергия системы может «безнаказанно» и беспричинно измениться на произвольную величину на такое время, которое подчиняется соотношению неопределенностей. То, что такая возможность в микромире вовсю реализуется, подтверждается рождением так называемых *виртуальных частиц*, возникающих «из ничего» и через некоторое время так же бесследно исчезающих.

## ВОЛНОВАЯ МЕХАНИКА ШРЁДИНГЕРА

При описании микромира пришлось отказаться от наглядных образов. Вместо этого был создан математический формализм, с помощью которого можно верно предсказывать результаты опытов (с той степенью полноты, с которой это в принципе возможно).

Первой целостной квантовой теорией стала волновая квантовая механика Шрёдингера (1926). Математически квантовая механика сложнее классической, и здесь мы познакомимся только с ее основными идеями.

Квантовая механика решает ту же основную задачу, что и классическая: зная начальное состояние системы, предсказать ее дальнейшие состояния, чтобы предугадать результаты измерений в любой момент.

Но понятие «состояние системы» в квантовой механике не такое, как в классической. В механике Ньютона состояние характеризуется координатами и скоростями всех частиц в данный момент. Одновременное знание координат и скоростей (а также всех действующих

сил) позволяет с помощью законов Ньютона вычислять траектории этих частиц.

**Интересно, что механика Шрёдингера — это не единственная квантово-механическая теория. Есть еще квантовая механика Гейзенберга, основанная на другом математическом формализме. У обеих теорий одна и та же область применимости (это нерелятивистские теории), и они дают одинаковые предсказания об исходах измерений, хотя и разными методами. Это, пожалуй, единственный (пока) прецедент в физике, когда одну и ту же истину удалось выразить на двух совершенно разных языках.**

В микромире координаты и скорости не могут быть определены одновременно. Для описания состояния вводится *волновая функция*, которая зависит только от координат (или только от импульсов) всех частиц. Волновая функция — это чистая абстракция, ненаблюдаемая вещь. Зато с ее помощью по определенным правилам можно вычислить все наблюдаемые физические величины (например, энергию) и предсказать вероятность нахождения частицы в том или ином месте.

В классической механике для решения основной задачи служит основное уравнение: второй закон Ньютона. В квантовой волновой механике таким является уравнение Шрёдингера. Основное уравнение как в классической, так и в квантовой механике не выводится, а постулируется. Его справедливость подтверждается тем, что все вытекающие из него следствия согласуются с опытом.

Но предсказания классической механики однозначны, а квантовая механика вместо однозначного ответа предсказывает вероятность того или иного исхода измерения. Состояния классической системы детерминированы, а эволюция квантовой системы принципиально не детерминирована. Главное открытие квантовой механики — *вероятностный характер законов микромира*.

**Знаменито возражение Эйнштейна против квантово-механических неопределенностей: «Я не верю, что Бог играет в кости». Не менее знаменит ответ Нильса Бора:**

**«Но, право же, не наша печаль — предписывать Господу Богу, как ему следовало бы управлять этим миром!»**

Волновая функция — это максимально полное описание состояния. Уравнение Шрёдингера позволяет найти волновую функцию системы в любой момент — в этом смысле предсказания квантовой механики абсолютно точны. Но знание волновой функции дает возможность предсказывать не однозначный результат измерения, а вероятность того или иного исхода измерения. Например, в ситуации с двумя щелями с помощью волновой функции можно вычислить вероятность попадания электрона в разные места экрана.

У квантовых объектов есть удивительное свойство, не имеющее аналогов в макромире: это *суперпозиция состояний*. Если у частицы возможны состояние 1 и состояние 2, то возможна также суперпозиция состояний «1 + 2» (одновременное пребывание в этих состояниях). Суперпозиция естественна для волн (например, две части волны, пройдя через две щели, накладываются друг на друга), но немыслима для классической частицы: она не может одновременно двигаться влево и вправо или проходить сразу через две щели. Квантовая же частица-волна может находиться в таком невообразимом состоянии, в чем мы убедились на примере опыта с двумя щелями. Но «подловить» частицу сразу в двух состояниях не удастся: в процессе измерения она «определится» и окажется либо в состоянии 1, либо в состоянии 2. Зато квантовая механика позволяет вычислить вероятность первого или второго исхода.

**Квантовая суперпозиция состояний — это основа квантовой криптографии. И именно явление суперпозиции заложено в идее квантового компьютера, что позволит ему работать неизмеримо быстрее классического при миниатюрных размерах и малом потреблении мощности. Создание полномасштабного квантового компьютера — одна из основных задач физики XXI века.**

## ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

Об этом квантовом эффекте, наверное, слышали все. Грубо говоря, если на пути микрочастицы имеется некий *потенциальный барьер*, на преодоление которого энергии частицы не хватает, она с некоторой вероятностью всё же может оказаться по другую сторону барьера.

В макромире такого не бывает. Представим, к примеру, что скользящий по гладкому столу кубик налетает на горку — она-то и представляет собой потенциальный барьер (рис. 20). Если кинетическая энергия кубика больше высоты потенциального барьера  $mgh$ , кубик перемахнет через горку и будет двигаться дальше. Если же энергии не хватит, кубик отскочит обратно.

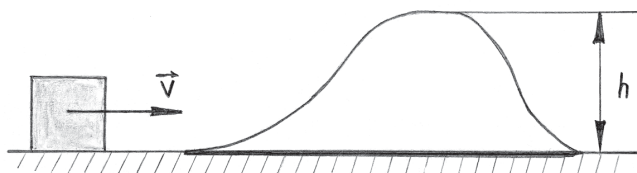


Рисунок 20

А вот квантовая частица в аналогичной ситуации имеет шанс туннелировать сквозь потенциальный барьер (барьер для микрочастицы — это силовое поле определенной конфигурации). Она просто оказывается по другую сторону барьера, сохранив всю свою энергию. Кстати, если энергия частицы превышает высоту барьера, она всё равно с какой-то вероятностью отражается от него (в макромире так ведут себя волны).

Это если говорить на нашем языке — языке эксперимента. А на языке квантовой механики частица и не «налетает», и не «отскакивает», и не «проходит сквозь барьер», а пребывает в состоянии квантовой суперпозиции: движение в сторону барьера, движение по другую сторону барьера и состояние отражения от барьера. Проводя же наблюдение, мы обнаружим частицу в одном из этих трех состояний и назовем их: она налетает на барьер, она прошла сквозь барьер или она отразилась от барьера. Кстати, есть шанс даже «застукать» ее под барьером, но для этого наблюдатель должен добавить частице

энергию, которой ей недоставало для «легального» преодоления барьера.

Высота и ширина барьера очень сильно влияют на вероятность туннелирования. Так, при увеличении ширины барьера в 10 раз вероятность туннелирования для электрона уменьшается в 100 миллиардов раз!

Легкие частицы туннелируют гораздо чаще, чем тяжелые. Скажем, тот барьер, через который электрон просачивается с вероятностью  $1/10$ , протон (который почти в две тысячи раз массивнее) с такой же энергией преодолет с вероятностью  $10^{-19}$ ! Понятно теперь, почему макроскопические тела не туннелируют совсем?

**Туннельный эффект объясняет ряд явлений, известных ещё в XIX веке, к примеру, контактную разность потенциалов, возникающую в месте соприкосновения двух металлов. Термоядерный синтез гелия из водорода в недрах Солнца возможен исключительно благодаря туннельному эффекту. А в современной науке наиболее известное его применение — это электронные туннельные микроскопы, которые могут «видеть» отдельные атомы.**

## РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ДИРАКА

В 1928 году Поль Дирак получил уравнение, обобщающее уравнение Шрёдингера на случай движения частиц с околосветовыми скоростями.

Самое интересное предсказание, вытекающее из уравнения Дирака, — существование позитрона — положительного двойника электрона, а также других *античастиц*. Каждая частица (кроме так называемых истинно нейтральных частиц, например фотона) имеет свою античастицу, имеющую заряд противоположного знака (чуть подробнее об этом поговорим в следующей главе). Позитрон был обнаружен в космических лучах в 1932 году, а другие античастицы — на ускорителях, которые начали строить после 1930 года.

Кроме того, из уравнения Дирака следовало, что у электрона (и других частиц) имеется ещё одна характеристика: *спин*. Он характеризует собственный момент импульса. Спин — особое свойство, присущее ми-

к рочастице, так же как ей присущи масса и заряд. Сначала спин пытались объяснить вращением частицы вокруг своей оси, подобно волчку («спин» в переводе с английского — вращение). Однако практически сразу от этой идеи пришлось отказаться и смириться с тем, что у спина нет наглядного образа. Покоится частица или движется произвольным образом — на спин это не влияет. Кстати, что такое масса и электрический заряд, мы тоже не можем наглядно объяснить, просто к этим характеристикам мы уже привыкли, изучая явления макромира.

**Спин (собственный момент импульса) имеется абсолютно у всех микрочастиц. Он вычисляется через безразмерное квантовое число  $s$ , которое тоже называют спином. У одних сортов частиц число  $s$  имеет целое значение (в том числе нулевое), у других — полуцелое. Так, у электрона спин  $s$  равен  $\frac{1}{2}$ , а у фотона — единице. Все частицы с полуцелым спином называют фермионами (в честь физика Ферми), а с целым — бозонами (в честь физика Бозе). Свойства бозонов и фермионов различны. Так, бозоны «дружат» друг с другом и могут находиться в одном и том же квантовом состоянии (примером служат фотоны в лазерном свете). Фермионы же как бы «избегают» друг друга: в одном квантовом состоянии могут находиться не более двух фермионов, причем их спины должны быть направлены противоположно. Это утверждение называют *запретом Паули*.**

Наличие спина у заряженных частиц приводит к дополнительному (по сравнению с классической электродинамикой) взаимодействию с магнитным полем. На опыте это дополнительное взаимодействие электронов с магнитным полем было обнаружено еще раньше, в 1925 году.

\* \* \*

Квантовая механика изменила наш взгляд на мир. Она сняла противопоставление частиц и волн и создала картину мира, которую можно назвать двуединой. Из нее вытекают глубокие философские след-

ствия. Главное ее открытие — вероятностный характер законов микромира. Она показала, что случайность и неопределенность лежат в основе природы вещей. Тем самым квантовая механика навсегда избавила нас от механического детерминизма, ведущего к фатализму в жизни, и подарила нам свободу воли.

Неустранимое влияние наблюдателя на объект изменило само понимание объективной реальности. Именно итог взаимодействия наблюдателя с микрообъектом и является для нас физической реальностью. Можно вспомнить философскую концепцию реальности Канта: есть «вещи в себе» и «вещи для нас»; лишь последние даны нам в ощущении. Объект микромира до акта наблюдения — «вещь в себе», итог измерения — «вещь для нас». Насколько полно наши измерения способны отражать реальность? Вопрос открытый. По замечанию Канта, ответы Природы определяются теми вопросами, которые мы способны Ей задать. А по выражению Нильса Бора, мы не только зрители спектакля, но одновременно и его действующие лица.

Квантовая механика подтверждена многочисленными экспериментами. До сих пор не предложено сколько-нибудь конкурентоспособных альтернатив этой теории.

## **ГЛАВА 2. МИР АТОМОВ И ЯДЕР**

### **РАДИОАКТИВНОСТЬ: АТОМЫ НЕ ВЕЧНЫ**

Ещё до момента полного признания своего существования (это случилось, как вы помните, в 1912 году) атомы уже лишились статуса вечных и неделимых. Произошло это после открытия явления радиоактивности в 1896 году.

Благодаря исследованиям Беккереля, Резерфорда, супругов Кюри и многих других было установлено, что некоторые вещества (их называли радиоактивными) могут самопроизвольно, без каких бы то ни было внешних воздействий, испускать три рода излучений. Альфа-лучи представляют собой поток тяжелых и энергичных заряженных частиц (дважды ионизованных атомов гелия). Бета-лучи оказались потоком быстрых электронов, а гамма-лучи — коротковолновым

электромагнитным излучением, подобным рентгеновскому, но с еще меньшими длинами волн.

**Три составляющих радиоактивных излучений сильно различаются по своей проникающей способности:  $\alpha$ -частицы задерживаются даже тонким листом бумаги,  $\beta$ -лучи могут пройти сквозь алюминиевую пластинку толщиной до 3 мм, а  $\gamma$ -лучи проходят сквозь слой свинца толщиной в несколько см. Альфа-частицы можно «увидеть» и невооруженным глазом — точнее говоря, увидеть крохотные вспышки (сцинтилляции), возникающие при попадании каждой альфа-частицы на экран, покрытый специальным веществом — люминофором. В 1911 году Резерфорд с помощью таких сцинтилляций исследовал рассеяние альфа-частиц атомами и открыл атомное ядро.**

На радиоактивность не влияют никакие даже самые интенсивные физические и химические воздействия — нагрев или охлаждение, изменение агрегатного состояния, обработка химическими реагентами.

В 1902 году физик Резерфорд и химик Содди смогли ответить на вопрос: откуда же берутся эти излучения? Они доказали прямым экспериментом, что *радиоактивные излучения сопровождают процесс превращения одного химического элемента в другой*. В некотором смысле это то, что безуспешно пытались осуществить средневековые алхимики (заметим, однако, что получить золото из ртути таким способом нельзя). С идеей вечности и неделимости атомов физикам и химикам было непросто расстаться. Например, Дмитрий Иванович Менделеев до конца жизни (он умер в 1907 году) так и не смог поверить в возможность превращения одних химических элементов в другие.

## **АТОМНОЕ ЯДРО И ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА**

Поначалу о строении атомов было известно одно: внутри них есть электроны (их окончательное открытие Дж. Дж. Томсоном состоялось в 1897 году). А что ещё? Это должно быть нечто положительно

заряженное и тяжелое, обеспечивающее практически всю массу атома. До 1911 года единственной гипотетической моделью атома была модель Томсона. Он предположил, что положительный заряд и масса равномерно распределены по объему атома. Электроны «вкраплены» в эту массу, подобно изюму в тесте (модель так и называли: «пудинг с изюмом»). О природе этой положительной субстанции не имелось никаких догадок.

Эрнст Резерфорд, уже прославившийся своими исследованиями радиоактивности, решил «прощупать» атом, бомбардируя его альфа-частицами, словно снарядами. Он направлял пучок альфа-частиц на тонкую золотую фольгу и наблюдал, как частицы рассеиваются ею. Предварительные оценки показывали, что весьма энергичные «снаряды» должны легко пронизывать не слишком плотную положительную субстанцию, отклоняясь лишь на малые углы. Каково же было его удивление, когда он обнаружил, что отдельные частицы отклонялись на очень большие углы — до  $180^\circ$  (доля таких частиц была около  $1/8000$ ) (рис. 21). Позднее Резерфорд говорил: *«Это было самое невероятное событие в моей жизни. Это было столь же невероятно, как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в лист бумаги, а он полетел бы в обратном направлении и попал в вас».*

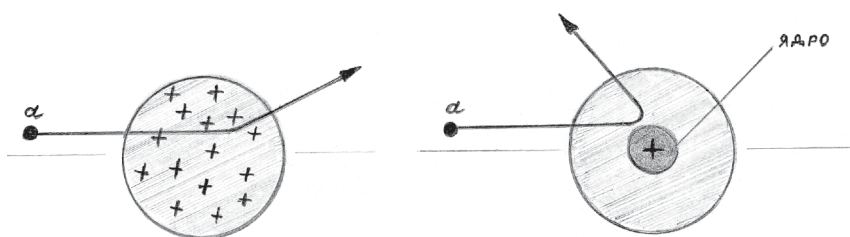


Рисунок 21. Что ожидалось при «обстреле» атома, и что изредка наблюдалось

Резерфорд сделал вывод, что каждое большое отклонение появляется в результате прямого попадания частицы в очень малое по размеру положительно заряженное ядро, в котором и сосредоточена практически вся масса атома (суммарная масса электронов в тысячи раз меньше).

В *планетарной модели* атома Резерфорда электроны обращаются вокруг ядра, подобно тому, как планеты обращаются вокруг Солнца. Радиус самой большой электронной орбиты и задает границу атома.

Радиус ядра в сто тысяч раз меньше размера атома. Для его измерения используют единицу длины *ферми* ( $\Phi$ ):

$$1 \Phi = 10^{-15} \text{ м.}$$

Радиусы ядер составляют несколько ферми. Это в сотни миллионов раз меньше длин волн видимого света. Атом ещё более «пустой», чем Солнечная система: если сопоставить ядро с Солнцем, то радиус электронной орбиты в атоме водорода примерно в 10 раз больше радиуса орбиты Плутона.

Казалось, планетарная модель — единственно возможная трактовка результатов эксперимента. Однако эта модель противоречит законам классической электродинамики. Ведь при движении с ускорением (а движение по орбите — это движение с ускорением) электрон должен излучать электромагнитные волны, теряя при этом энергию. Расчеты показали, что из-за этого излучения электрон должен упасть на ядро быстрее, чем за стомиллионную долю секунды!

Планетарную модель Резерфорда спас молодой теоретик Нильс Бор. Он предположил, что для электронных орбит в атоме законы классической физики недействительны (ведь события 1900 и 1905 годов уже выявили непригодность классических законов для объяснения теплового излучения и фотоэффекта). Бор постулировал наличие особых стационарных орбит для электронов в атоме, находясь на которых электроны не излучают. Излучение может происходить только при переходе с одной стационарной орбиты на другую.

Для простейшего атома — атома водорода — Бор предложил способ отбора стационарных орбит, на основе которого он смог вычислить энергии электрона на этих орбитах, а главное — частоты излучения атома водорода. Эти частоты давно уже были экспериментально определены, и результаты вычислений Бора точнейшим образом с ними совпали. Такой успех заставил физиков принять эти странные постулаты.

Благодаря теории Бора идеи *квантования* (дискретного характера физических величин в микромире) распространились не только на свет, но и на другие объекты микромира. Оказалось, в частности, что квантуется энергия электронов в атоме. Это вскоре было подтвержде-

но в опытах. Теория Бора стимулировала постановку многих экспериментов, принесших новые открытия.

Позднее, когда была построена квантовая механика Шрёдингера, необходимость в боровских постулатах отпала — можно сказать, они послужили «строительными лесами» для развития квантовой механики.

## АТОМ ГЛАЗАМИ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Поговорим о простейшем атоме — атоме водорода. Все характеристики его стационарных состояний (энергию, момент импульса и некоторые другие) можно вычислить на основе уравнения Шрёдингера и общих принципов квантовой механики — никаких отдельных постулатов для этого не требуется. Для более сложных атомов уравнение Шрёдингера не поддается точному решению, но общие умозаключения все же позволяют делать.

У электрона в атоме не может быть определенной траектории, как это предполагалось в теории Бора. Можно говорить лишь о вероятности нахождения электрона в том или ином месте пространства. Электрон как бы размазан вокруг ядра в виде «электронного облака» той или иной конфигурации. С отличной от нуля вероятностью он даже может находиться в пределах ядра! Но «отщипнуть кусочек» от электронного «облака» невозможно: при любых измерениях мы обнаружим целый электрон.

Области наиболее вероятного пребывания электрона в атоме называют *орбиталями*. Их изображают в виде трехмерных рисунков (в изометрической проекции на плоскость). Есть орбитали сферические, гантелеобразные и прочие, ещё более сложных форм (рис. 22). У них нет четких пространственных границ — строго говоря, они простираются до бесконечности.

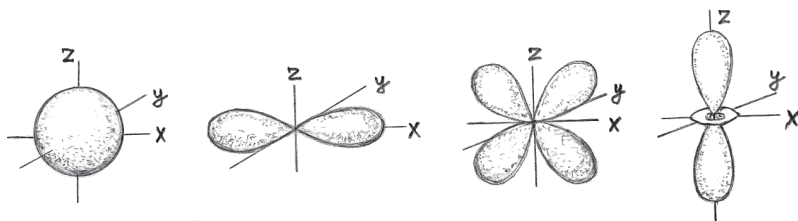


Рисунок 22. Примеры (сильно упрощенные) орбиталей различных конфигураций

Орбитали можно уподобить пустым квартирам, в которых может поселиться электрон. Даже в атоме водорода с одним-единственным электроном имеется бесконечное число возможных орбиталей. Электрон обычно «живет» на орбитали, соответствующей самому низкому из возможных значений энергии, — такое состояние атома называют *основным*. Состояния с более высокими значениями энергии называют возбужденными.

Раз у орбиталей нет четких границ, понятие «размер атома» становится весьма условным. За размер атома принимают расстояние, на котором вероятность нахождения электрона максимальна. В этом смысле диаметр атома водорода в основном состоянии равен примерно 0,1 нм ( $10^{-10}$  м). Но в возбужденных состояниях он может быть в тысячи раз больше!

**В многоэлектронных атомах электроны заполняют орбитали, начиная с самых низкоэнергетичных, соблюдая запрет Паули: не больше двух электронов (с противоположно направленными спинами) на одной орбитали. Чем больше порядковый номер атома, тем больше в нем электронов и тем большее количество разных орбиталей будет заполнено. Орбитали с близкими значениями энергии группируются в оболочки. Последняя из заполняемых электронами оболочек, наиболее удаленная от ядра, определяет химические свойства элемента.**

## СОСТАВ ЯДРА

Когда Резерфорд на опыте установил существование атомного ядра, было невозможно сказать, из чего оно состоит. Первая составная частица любого ядра — протон (ядро атома водорода) — была официально открыта Резерфордом в 1919 году, и он же дал протону это имя (*от греч. protos* — первый, основной). Резерфорд доказал на опыте, что протон входит в состав ядра, осуществив первую в мире искусственную ядерную реакцию: «выбивание» протона из ядра азота с помощью альфа-частиц.

Некоторое время предполагали, что ядра состоят из протонов и электронов: ведь при радиоактивном бета-распаде из ядер вылетают

электроны — значит, они там были? Однако по целому ряду параметров протонно-электронная модель ядра противоречит законам квантовой механики.

Наконец, в 1932 году был открыт нейтрон — нейтральная частица, по массе почти такая же, как протон. Нейтроны вылетали из бериллия при облучении его альфа-частицами.

Советский физик Дмитрий Иваненко и независимо от него Гейзенберг первыми предположили, что именно нейтроны наряду с протонами входят в состав ядра. А появление электрона при бета-распаде они совершенно верно трактовали как его рождение: нейтрон в ядре превращается в протон, и при этом рождается электрон, так что суммарный заряд сохраняется. Идея о том, что протон и нейтрон обладают одинаковой «степенью элементарности» и что они могут превращаться друг в друга, испуская электрон или позитрон, в дальнейшем подтвердилась.

Протоны и нейтроны называют одним словом *нуклоны* — «ядерные частицы».

У протона и нейтрона нет какой-то твердой оболочки, как у ореха, их условный радиус немного меньше одного ферми ( $10^{-15}$  м).

**Ядро атома с порядковым номером  $Z$  (в таблице Менделеева) содержит  $Z$  протонов и имеет положительный заряд  $+Ze$  ( $Z$  называют *зарядовым числом*). Массовое число  $A$  показывает, сколько всего нуклонов в ядре. Число нейтронов в нем ( $A - Z$ ). Состав ядра указывается в символической записи:  ${}^A_ZX$ . Здесь  $X$  — символ химического элемента,  $Z$  — зарядовое число,  $A$  — массовое число. Например,  ${}^4_2\text{He}$  — ядро гелия (оно же — альфа-частица).**

В свободном состоянии, то есть вне ядра, протон стабилен и может существовать бесконечно долго, а нейтрон в свободном состоянии живет всего несколько минут и распадается на протон и электрон. Только в ядре нейтроны могут существовать сколь угодно долго (если это не радиоактивное ядро).

Многие химические элементы существуют в природе в нескольких вариантах: зарядовые числа (то есть число протонов в ядре) у них одинаковые, а число нейтронов отличается. Такие элементы называются

ют *изотопами*. Химические свойства изотопов тождественны, они различаются только массой. Одни изотопы могут быть стабильны, а другие — радиоактивны.

**У водорода есть три изотопа:  ${}^1_1\text{H}$  — обычный (легкий) водород,  ${}^2_1\text{H}$  — тяжелый водород, или дейтерий (один протон и один нейтрон),  ${}^3_1\text{H}$  — сверхтяжелый водород, или тритий (один протон и два нейтрона). Легкий водород и дейтерий стабильны, а тритий радиоактивен. Чемпион по количеству стабильных изотопов — олово: 10 изотопов.**

## ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Как же одноименно заряженные протоны удерживаются в ядре? Ведь силы их электрического отталкивания на столь малых расстояниях огромны! Оказывается, между любой парой нуклонов, независимо от их электрического заряда, действуют ещё более мощные *ядерные силы* притяжения.

Классическая физика знала только о двух типах взаимодействий: гравитационном и электромагнитном. Ядерные силы — это проявление особого типа взаимодействий: так называемого *сильного взаимодействия*. (Подробнее о сильном взаимодействии мы будем говорить в следующей главе.)

Отличительная особенность ядерных сил — это то, что они действуют только на очень малых расстояниях. Действие электромагнитных и гравитационных сил, хотя и убывает с расстоянием, но простирается сколь угодно далеко. А ядерное притяжение резко обрывается, когда расстояние между центрами нуклонов достигает определенной величины, которая называется *радиусом действия ядерных сил*. Это расстояние чуть больше диаметра нуклона, то есть нуклоны должны подойти друг к другу почти вплотную, чтобы ядерное притяжение сработало.

Взаимодействие нуклонов в ядре описывает модель, предложенная японским теоретиком Юкавой в 1935 году и названная в его честь.

В этой модели предполагается, что ядерное притяжение возникает из-за того, что нуклоны обмениваются, словно мячиками, особыми частицами, которые впоследствии были названы пи-мезонами, или пио-

нами (они были открыты в 1947 году в космических лучах). По массе они примерно в 270 раз тяжелее электрона.

Каждый нуклон создает вокруг себя облако *виртуальных* пи-мезонов, рождая их «из ничего» на короткое время. Согласно соотношению неопределенностей, время жизни виртуальной частицы тем меньше, чем больше ее масса (и, значит, энергия покоя). Для виртуального пи-мезона время жизни — порядка  $10^{-23}$  секунды. За это время он может удалиться от породившего его нуклона на очень малое расстояние — оно-то и определяет радиус действия ядерных сил.

**Пи-мезоны бывают трех видов: два заряженных ( $\pi^+$  и  $\pi^-$ ) и один нейтральный ( $\pi^0$ ). Испуская  $\pi^+$ -мезон, протон превращается в нейтрон. Нейтрон, поглощая  $\pi^+$ -мезон, превращается в протон. Нейтрон, испуская  $\pi^-$ -мезон, превращается в протон, а протон, поглощая  $\pi^-$ -мезон, превращается в нейтрон. Только  $\pi^0$ -мезоны не вызывают никаких превращений. Два протона (как и два нейтрона) могут взаимодействовать только через нейтральный пи-мезон. А протон с нейтроном — через заряженные и нейтральные пи-мезоны. Таким образом, протоны в ядре непрерывно превращаются в нейтроны, а нейтроны — в протоны. Поэтому в составе ядра вообще нет принципиальной разницы между протонами и нейтронами (неизменно только общее число протонов и нейтронов). Их можно рассматривать как два состояния одной частицы — нуклона.**

Если на этом расстоянии нет других нуклонов, то все виртуальные пи-мезоны поглощаются нуклоном-родителем. Если же имеются другие нуклоны, то становится возможным обмен пи-мезонами — и возникает ядерное притяжение нуклонов.

Можно ли поймать виртуальный пи-мезон? Да, если «легализовать» его самостоятельное существование, то есть передать ему энергию, превышающую его энергию покоя (аналогично тому, как можно обнаружить частицу под потенциальным барьером, сообщив ей при измерении достаточную энергию). На ускорителях при бомбардировке ядер протонами рождается много пи-мезонов.

## ЧТО ПРОИСХОДИТ ПРИ РАДИОАКТИВНЫХ РАСПАДАХ

Все ядра тяжелее урана нестабильны, так как слишком большое число протонов в конце концов «разваливает» ядро: ведь *все* протоны в пределах ядра электрически отталкиваются, а ядерные силы «склеивают» только ближайших соседей. Более легкие радиоактивные изотопы нестабильны, если содержат избыток или дефицит нейтронов по сравнению со стабильными ядрами того же элемента.

Некоторые ядра распадаются путем альфа-распада, другие — путем бета-распада, а гамма-излучение может сопровождать любой из этих видов распада. Природный образец радиоактивного минерала всегда содержит целое семейство радиоактивных изотопов, так что все три вида радиоактивных излучений обычно наблюдаются одновременно.

Всем видам радиоактивного распада присущ общий закон протекания процесса во времени. Однозначно предсказать, когда распадется конкретное ядро, невозможно — процесс носит вероятностный характер, причем эта вероятность не зависит от времени: каждую следующую секунду шанс распасться для конкретного ядра не зависит от того, сколько уже это ядро «прожило». Образно говоря, ядра распадаются, но не стареют.

В качестве характеристики скорости процесса распада используют интервал времени  $T$ , за который число исходных (материнских) ядер убывает в два раза — это так называемый *период полураспада*. С какого бы момента времени мы ни начали отсчет, за время  $T$  число материнских ядер уменьшится вдвое, через время  $2T$  — в  $2^2=4$  раза, через время  $3T$  — в  $2^3=8$  раз и так далее. Период полураспада для разных изотопов может варьироваться от долей секунды до миллиардов лет.

При альфа-распаде ядро «выплевывает» альфа-частицу, состоящую из двух протонов и двух нейтронов. Вылет альфа-частицы из ядра — это туннельный эффект: ее энергия меньше высоты потенциального барьера, удерживающего частицу в ядре.

Вообще, с точки зрения квантовой механики понятие стабильного ядра весьма условно. В принципе, любое ядро может распасться за счет туннельного эффекта, но, когда вероятность туннелирования столь мала, что вряд ли реализуется за время жизни Земли и Вселенной, мы можем считать ядро стабильным.

При бета-распадах из ядра вылетает электрон или позитрон. При этом вылетающий электрон или позитрон не присутствовал в ядре изначально, но родился непосредственно перед вылетом в результате превращения протона в нейтрон или наоборот. Так что бета-распад — это внутринуклонный процесс.

Позднее было установлено, что при всех видах бета-распадов вылетает еще одна незаряженная частица — нейтрино или антинейтрино, имеющая почти нулевую массу и движущаяся поэтому практически со световой скоростью. Она почти не взаимодействует с веществом, поэтому обнаружить ее удалось далеко не сразу. Главным аргументом в пользу существования нейтрино было кажущееся несохранение энергии при бета-распадах. Чтобы «спасти» закон сохранения энергии, Вольфганг Паули и «придумал» в 1930 году нейтрино. Зарегистрировать эту неуловимую частицу удалось лишь 25 лет спустя.

**Нейтрино настолько мало взаимодействует с веществом, что могло бы без помех пролететь в воде расстояние от Земли до далеких звезд! Поэтому «отец» нейтрино Паули полагал, что нейтрино никогда не будет напрямую зарегистрировано и даже заключал об этом пари. И все же через 25 лет, в 1956 году, он проиграл пари: американским физикам удалось зарегистрировать нейтрино от ядерного реактора — мощного источника нейтрино, о чем экспериментаторы известили Паули телеграммой. Сегодня мы знаем, что наш мир буквально кишит нейтрино! Каждую секунду ваше тело пронзает более миллиона миллиардов нейтрино (в основном от Солнца), не оказывая никакого вреда.**

При любых радиоактивных распадах выделяется энергия в виде кинетической энергии вылетающих частиц, поэтому образец, содержащий достаточно много радиоактивных изотопов, всегда теплый на ощупь. Поначалу физики были в недоумении: откуда берется этот «неисчерпаемый» запас энергии? Только после создания специальной теории относительности удалось разгадать эту загадку.

Выделение энергии связано с уменьшением суммарной массы: масса материнского ядра всегда больше суммы масс продуктов распада.

Вот эта-то «пропавшая» масса и превращается в кинетическую энергию продуктов распада в соответствии с формулой Эйнштейна  $E = mc^2$ .

**В земной коре и мантии присутствуют радиоактивные изотопы. Четыре из них особенно важны: уран-238, уран-235, торий-232 и калий-40 (указаны массовые числа изотопов). Их распад идет очень медленно. Энергия, выделяющаяся при распадах, превращается в конечном счете в тепло земных недр. Общее количество тепла, произведенного радиоактивными изотопами, — это мощный энергетический фактор, влияющий на температуру земных недр. В прошлом радиоактивность Земли была ещё более высокой. 4,5 миллиарда лет назад, когда Солнечная система только образовалась, урана-235 на Земле было в 100 раз больше, а калия-40 — в 12 раз. Следовательно, в прошлом радиоактивность была ещё более мощным источником внутреннего нагрева Земли, чем в современную эпоху.**

## **РАДИАЦИЯ В НАШЕЙ ЖИЗНИ**

Радиоактивные излучения, как и рентгеновское излучение, попадая в ткани организма, *ионизируют* молекулы, которые затем вступают в «неправильные» реакции с молекулами клеток. В результате клетка гибнет или становится неполноценной. Поглощенная единицей массы тела энергия ионизирующих излучений — мера вредности всех последующих процессов в живом организме (в дозиметрии ее называют *поглощенной дозой*).

Радиоактивные излучения — один из естественных факторов окружающей среды. Естественный радиационный фон, если он в норме, не вреден, а скорее необходим человеку.

**Опыты показали: если животных или растения полностью защитить от естественного облучения, они перестают нормально развиваться. Если уровень радиации чуть выше фонового, живые организмы развиваются ускоренно и их жизнеспособность повышается. Такому стимулирующему облучению подвергают семена растений, яйца птиц.**

Основную часть облучения мы получаем от естественных источников, два главных из которых — это космические лучи и излучения земных недр.

Космические лучи, обеспечивающие около 1/6 части дозы облучения (на уровне моря) — это потоки быстрых заряженных частиц (в основном протонов), которыми нас «обстреливают» Солнце и другие объекты Галактики. Магнитное поле Земли и атмосфера прекрасно защищают всё живое от этих излучений.

**Космические лучи представляют большую опасность для космических путешествий. Так, космонавты МКС за один год получают примерно в 100 раз большую дозу, чем на Земле. А за год полета в межпланетном пространстве доза была бы ещё в два–четыре раза больше, создавая ощутимую угрозу для здоровья. Поэтому при планировании межпланетных полетов защита от космических лучей — одна из приоритетных задач.**

Уран и торий в земной коре являются родоначальниками длинных цепочек радиоактивных превращений. Один из продуктов распада уранового ряда — радон, радиоактивный газ без запаха и цвета. Его период полураспада — чуть меньше четырех суток. Радон просачивается в атмосферу из скальных пород, почвы и стройматериалов.

Радон и короткоживущие продукты его распада отвечают за  $\frac{3}{4}$  дозы облучения от земных источников и половину дозы от всех естественных источников. Попадая в дыхательные пути, излучения радона и продуктов его распада вызывают повреждения легких и бронхов, что намного увеличивает риск заболеть раком легких. Многие ученые считают радон второй по значимости (после курения) причиной рака легких у человека.

Радон тяжелее воздуха, поэтому он может скапливаться в подвалах зданий, проникая оттуда и на нижние этажи. Концентрация радона в закрытых помещениях в несколько раз выше, чем в наружном воздухе. Меры защиты от радона — герметизация подвалов, а главное — регулярное проветривание помещений.

Что касается техногенных источников радиации, то их вклад в облучение населения в нашей стране невелик: в среднем раз в шесть меньше естественной дозы. Практически весь этот вклад вносят меди-

цинские обследования и лечение (рентген, компьютерная томография, лучевая терапия...). В США медицинский вклад в облучение в XXI веке стал превышать естественную дозу.

## **АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И АТОМНЫЕ БОМБЫ**

История атомных реакторов и атомных бомб началась в 1938 году, когда было обнаружено, что при бомбардировке урана-235 нейтронами происходит деление ядер урана на две части. Существенно, что процесс деления всегда сопровождается испусканием нескольких «лишних» нейтронов. Эти нейтроны позволяют реализовать на практике цепную реакцию деления.

**После того как Резерфорд осуществил первую искусственную ядерную реакцию (в 1917 году), журналисты спросили его, когда, по его мнению, человечество научится пользоваться ядерной энергией. «Через 100 лет», — сказал Резерфорд. Однако уже через 25 лет, в 1942 году, в США под руководством Энрико Ферми был построен первый ядерный реактор. Первая атомная электростанция заработала в Обнинске в 1954 году.**

При каждом акте деления ядра выделяется значительная энергия (в основном в виде кинетической энергии ядер-осколков) — она в миллионы и миллиарды раз больше энергии любых химических реакций (при той же массе топлива). Как и при радиоактивном распаде, причина выделения энергии — уменьшение суммарной массы при делении.

При торможении продуктов деления в веществе их кинетическая энергия превращается в теплоту. Именно выделяющаяся теплота используется как в атомной бомбе, так и в атомном реакторе — разница между ними в скорости выделения энергии. В бомбе энергия высвобождается практически мгновенно, а в реакторе выделяемая мощность должна поддерживаться на строго фиксированном уровне. Скоростью цепной реакции управляют с помощью передвижения в активной зоне реактора регулирующих стержней из материала, хорошо поглощающего нейтроны.

Для создания первой атомной бомбы, а затем и атомного реактора пришлось преодолеть много трудностей. Одна из главных: цепная ре-

акция деления невозможна в природном уране, так как 99,3% природного урана составляет другой его изотоп – уран-238, ядра которого делятся плохо, и только 0,75% – уран-235. Для работы реактора содержание нужного изотопа в природном уране повышают в несколько раз. Для взрыва атомной бомбы требуется гораздо более высокое содержание урана-235.

Для начала самоподдерживающейся цепной реакции необходимо, чтобы масса делящегося вещества превысила определенную критическую массу, ведь часть нейтронов уходит через поверхность образца или поглощается ядрами, не вызывая деления. Критическая масса урана-235 сферической формы – 47 кг.

**Схема атомной бомбы очень проста: в металлический корпус помещают два куска ядерного топлива (чистого урана-235), окруженные отражателем нейтронов, и взрывное устройство. Массы кусков чуть больше половины критической массы. При падении бомбы происходит «обычный» взрыв, два куска ядерного топлива сближаются — и запускается цепная реакция деления.**

Сейчас на долю атомных электростанций приходится около 10% от мирового производства электроэнергии, причем половину атомной энергии производят две страны: США и Франция.

**За всё время существования АЭС произошло около 400 аварий разной степени опасности. Самая крупная из них — Чернобыльская (1986). Там во время учений было удалено избыточное число регулирующих стержней, и за 4 секунды выделяемая мощность возросла в 100 раз, произошел взрыв пара, а также разгерметизация системы охлаждения и повреждение плит радиационной защиты. В воздух было выброшено 8 тонн уранового топлива и радиоактивных продуктов деления.**

Атомная энергетика сама по себе вносит очень малый вклад в облучение населения. Нормально работающая АЭС меньше загрязняет среду, чем другие типы электростанций. Зато очень опасны аварии на АЭС.

## ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Еще один способ «сыграть» на потере массы, чтобы получить выделение энергии, — это соединять легкие ядра в более тяжелые, вплоть до железа. Такой процесс ядерного синтеза идет в недрах звезд, что и обеспечивает их излучение на протяжении миллионов и миллиардов лет.

Вы не задумывались, откуда взялись в природе все химические элементы? Ведь изначально (точнее, к моменту образования первых звезд) во Вселенной присутствовали только два элемента: водород (около 75%) и гелий (около 25%). Все остальные химические элементы, вплоть до железа, образовались в недрах звезд в ходе термоядерного синтеза. Почему «термо»? Потому что ядерный синтез идет в звездах при очень высоких температурах.

Элементы же тяжелее железа синтезировались во время взрывов сверхновых звезд, когда ядра с огромными скоростями «впечатывались» друг в друга. Так что все мы родом из звезд.

Чтобы могла произойти реакция синтеза, два ядра должны сблизиться на расстояние, равное радиусу действия ядерных сил. Для этого им надо преодолеть барьер кулоновского отталкивания, который тем выше и шире, чем больше заряды ядер. Сообщить ядрам необходимую для этого кинетическую энергию можно двумя способами: на ускорителе или путем нагревания.

**При формировании Земли из протопланетного облака присутствовали все химические элементы, включая трансурановые. Однако за 4,5 млрд лет жизни Земли все трансураны распались, поэтому таблица Менделеева до 1940 года заканчивалась ураном ( $Z = 92$ ).**

Ускорители используют для синтеза трансурановых элементов. Для этого тяжелый элемент бомбардируют различными частицами: нейтронами, альфа-частицами или ионами. Уже удалось синтезировать элементы до  $Z = 118$  (многие из них, в том числе 114, 116, 117, 118, были впервые синтезированы на ускорителе в Дубне).

Что касается нагревания, то даже при минимальном заряде обоих ядер  $Z = 1$  для легального преодоления барьера требуется температура порядка 2 млрд градусов! Такие температуры нам недоступны. В недрах Солнца температура и то ниже (15 млн градусов). Спасает ситуацию тун-

нельный эффект, благодаря которому некоторые термоядерные реакции протекают уже при десятках млн градусов.

Пока что нам доступен только неуправляемый термоядерный синтез – термоядерная (водородная) бомба. Чтобы достигнуть температуры, необходимой для запуска термоядерного синтеза, сначала взрывают атомную бомбу.

Уже много десятилетий человечество надеется научиться получать энергию в промышленных масштабах в *управляемых* реакциях термоядерного синтеза.

Наиболее легко достижимой представляется реакция на изотопах водорода дейтерия и трития ( $Z=1$ ): требуется разогреть смесь дейтерия и трития «всего навсего» до 200 млн градусов. Основная проблема: как удержать в замкнутом объеме столь сильно раскаленное вещество в течение достаточного для осуществления реакции времени? При этом оно не должно соприкасаться со стенками реактора, которые не способны выдержать такую температуру.

Самыми перспективными устройствами считаются токамаки – Тороидальные Камеры с Магнитными Катушками, впервые предложенные А.Д. Сахаровым и И.Е. Таммом в 1950 году. Раскаленная дейтериво-тритиевая плазма в токамаке удерживается специально создаваемым комбинированным магнитным полем.

Несмотря на многолетние старания, время удержания плазмы всё еще недостаточно (требуется увеличить его хотя бы в 10 раз).

С экологической точки зрения «термояд» был бы идеальным вариантом: не расходуется кислород из атмосферы, она не загрязняется продуктами сгорания, среди продуктов реакции нет вредных веществ. Что касается доступности топлива, то дейтерий можно извлекать из воды, запасы которой на земле практически неисчерпаемы, а тритий легко получается искусственным путем при облучении лития нейтронами. Так что запасов топлива хватило бы на сотни тысяч лет.

**Еще в 1970 году ученики Игоря Евгеньевича Тамма, одного из отцов токамака, к юбилею учителя сочинили частушку:  
«Говорят, говорят, скоро будет термояд. Будет мирный, будет смирный, управляемый. Нам об этом термояде говорили в детстве дяди. А теперь мы сами дяди, сами то же говорим**

**И мечтой о термояде все горим, горим, горим!» Частушка актуальна до сих пор.**

За прошедшие полвека надежды на скорое решение энергетических проблем человечества с помощью термоядерного синтеза поутихли, хотя работы над проблемой не прекращаются. Прогнозируется, что нужно ещё несколько десятилетий, прежде чем промышленное использование термоядерного синтеза станет возможным.

**С 1980-х годов создается ITER — Международный экспериментальный термоядерный реактор-токамак. Доля России в нем огромна. Он строится под Марселем, имеет диаметр около 1 км, вес 23 тыс. т, расчетная полезная мощность 500 млн Вт. Завершение работы планируется к 2025 году, но сроки уже неоднократно отодвигались.**

## **ГЛАВА 3. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Теорию, которая на сегодня наилучшим образом отражает наши представления об исходном материале, из которого изначально построена Вселенная, принято называть *Стандартной моделью*. Она описывает, как именно материя образуется из этих базовых компонентов, а также объясняет механизмы взаимодействия между ними. Ее построение было в основном завершено к 1980-м годам. Все предсказания этой модели к настоящему времени экспериментально подтверждены.

В этой главе мы познакомимся с основными положениями Стандартной модели.

### **ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И АНТИЧАСТИЦЫ**

Все атомы, из которых состоит вещество Вселенной, построены из трех элементарных частиц: протонов, нейтронов и электронов. Определение «элементарные» изначально подразумевало их статус первичных кирпичиков мироздания.

Но постепенно в космических лучах, а также на ускорителях открывали все новые и новые частицы, число их достигло нескольких сотен. При столкновении ускоренных частиц друг с другом из их кинетической энергии рождаются другие частицы (на основе всё той же формулы Эйнштейна  $E=mc^2$ , с соблюдением определенных законов). Большинство из них живут очень короткое время, распадаясь и превращаясь в другие частицы.

Все эти частицы по-прежнему называют элементарными, потому что расщепить их на составные части невозможно. Они распадаются, но не на составные части, а рождая другие частицы.

Кроме того, обнаружилось, что практически у каждой из элементарных частиц (кроме фотона и нейтрального пи-мезона) имеется своя античастица. Частица и античастица имеют в точности равные массы, спины и время жизни, но противоположные знаки электрического заряда (если он есть) и некоторых других характеристик. При встрече частицы и ее античастицы происходит **аннигиляция** — взаимоуничтожение с освобождением энергии, равной энергии покоя исходных частиц; эту энергию уносят фотоны и пи-мезоны.

Аннигиляция — это единственный способ превратить *всю* массу в энергию. При аннигиляции 1 г вещества и антивещества выделяется энергия порядка  $10^{14}$  Дж, что эквивалентно взрыву атомной бомбы, которая вдвое мощнее той, что разрушила Хиросиму.

**Получение антивещества на Земле — технически очень сложная задача. Первые атомы водорода получены лишь в 1995 году на ускорителе Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН). На сегодня, помимо атомов антиводорода, удалось синтезировать атомы антигелия. Антиатомы — это «штучный товар». И живут они из-за опасности аннигиляции недолго. Рекорд удержания антиатомов в магнитных ловушках составляет около 17 минут.**

Античастицы участвуют в тех же взаимодействиях, что и частицы. Антипротоны и антинейтроны благодаря сильному взаимодействию соединяются в антиядра. Благодаря электромагнитному взаимодействию антиядра «обрастают» позитронами и превращаются в антиатомы, а они соединяются в антимолекулы. Антивещество обладает теми же свойствами, что и обычное вещество. Если бы существовали антизвезды, то они излу-

чали бы точно такой же свет, как и обычные звезды, и, наблюдая за ними в телескопы, мы не могли бы их различить.

Единственный способ обнаружить антивещество — это столкнуть его с веществом, чтобы произошла аннигиляция.

Тем не менее ученые полагают, что во Вселенной практически нет антивещества (хотя попытки его обнаружить не прекращаются). Почему нет? Это до сих пор одна из самых больших загадок физики и космологии.

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

При попытках объяснить все разнообразные превращения элементарных частиц был открыт новый вид взаимодействия, которое назвали *слабым*. Оно, действительно, гораздо слабее сильного взаимодействия и действует на ещё более малом расстоянии: если радиус действия сильного взаимодействия около 2 ферми (чуть больше размера протона), то слабого — в тысячу раз меньше. Именно слабое взаимодействие ответственно за превращения нейтрона и протона друг в друга, которые происходят при бета-распадах ядер.

Итак, *все процессы в микромире управляются тремя фундаментальными взаимодействиями: сильным, слабым и электромагнитным*.

Гравитационное же взаимодействие между элементарными частицами несоизмеримо слабее, так что о нем в микромире можно попросту забыть.

Все эти взаимодействия осуществляются посредством особых *частиц-переносчиков* — подобно тому, как это происходит при взаимодействии нуклонов в ядре, согласно модели Юкавы. Про переносчиков фундаментальных взаимодействий у нас будет потом особый разговор, а сейчас поговорим о *частицах-участниках*, между которыми и могут происходить взаимодействия.

Слабое взаимодействие — самое универсальное: в нем участвуют абсолютно все частицы, в отличие от сильного.

Те элементарные частицы, которые участвуют в сильном взаимодействии, назвали *адронами* (от греч. «адрос» — сильный). Таких частиц около 400 видов. Оставшиеся немногие частицы (их шесть видов и столько же античастиц) назвали *лептонами* (от греч. «лептос» — легкий), потому

что первые из открытых лептонов — электрон и нейтрино — и в самом деле гораздо легче адронов.

Можно ли как-то «прощупать» частицы, чтобы определить их размеры и наличие (или отсутствие) внутренней структуры? Для этого применили по сути тот же метод, что в свое время использовал Резерфорд для «прощупывания» атома. Только вместо альфа-частиц в качестве снарядов служили самые быстрые электроны, которые были разогнаны на ускорителе. Чем быстрее электроны, тем меньше их дебройлевская длина волны и тем более мелкие детали они способны обнаружить.

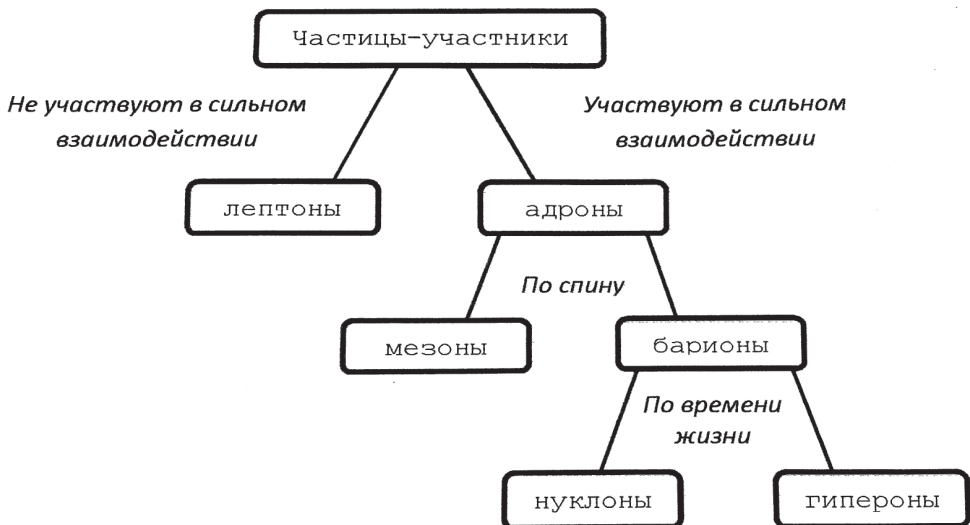
Оказалось, что все адроны имеют сложную внутреннюю структуру.

А вот лептоны не имеют внутренней структуры, и размеры их неопределимо малы (в Стандартной модели считается, что они вообще не имеют собственного размера). Лептонам присвоен статус *фундаментальных частиц*.

Множество адронов, в свою очередь, делятся на две группы — *мезоны* с целым спином и *барионы* с полуцелым. Мезоны (*от греч.* «мезос» — средний) по массе меньше барионов (*от греч.* «барос» — тяжелый).

Среди барионов как особые подклассы выделяют нуклоны (самые долгоживущие и самые «полезные» из всех адронов) и гипероны (сверхтяжелые).

Представим классификацию всех частиц-участниц в виде схемы:



Обсудим адроны и лептоны подробнее.

## ЛЕПТОНЫ

Итак, лептоны — фундаментальные частицы, не участвующие в сильном взаимодействии. Всего лептонов шесть видов плюс шесть антилептонов.

Три лептона несут отрицательный заряд, равный заряду электрона: это сам электрон  $e^-$  и его более тяжелые «братья» мюон  $\mu^-$  и таон (или тау-лептон)  $\tau^-$ . Соответствующие им антилептоны несут положительный заряд (их обозначают  $e^+$ ,  $\mu^+$ ,  $\tau^+$ ): Мюон в  $10^7$  раз массивнее электрона, а таон почти вдвое массивнее протона!

Три других, незаряженных, лептона — «братья»-нейтрино: электронное нейтрино  $\nu_e$ , мюонное нейтрино  $\nu_\mu$  и таонное нейтрино  $\nu_\tau$ . Каждому из них соответствует свое антинейтрино (антинейтрино отличаются от нейтрино проекцией спина на направление движения, их обозначают  $\bar{\nu}_e$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ ,  $\bar{\nu}_\tau$ ). Чем отличаются друг от друга разные виды нейтрино, сказать сложно, но в процессах с электроном или позитроном всегда участвуют только электронные нейтрино и антинейтрино, и аналогично в процессах с мюонами и таонами.

Мюон и таон (как и их античастицы) живут недолго и распадаются, превращаясь в конечном счете в электрон (античастицы — в позитрон).

Время жизни всех видов нейтрино не ограничено. Нейтрино имеют ненулевые массы, однако они пока не измерены. Известно лишь, что эти массы очень малы.

Шесть лептонов делят на три группы (поколения) следующим образом:

Лептон время жизни	$e^-$ не ограничено	$\mu^-$ (мюон) $2,2 \cdot 10^{-6}$ с	$\tau^-$ (таон) $\approx 10^{-13}$ с
Лептон	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$

*I поколение*

*II поколение*

*III поколение*

## ИЗ ЧЕГО СОСТОЯТ АДРОНЫ?

Адроны не являются фундаментальными частицами. Их составной характер уже доказан теоретически и экспериментально. Заметьте: со-

ставные части есть, а расщепить нельзя. Как так получается? Эту загадку мы обсудим чуть позже.

В 1964 году американцы Гелл-Манн и Цвейг независимо друг от друга выдвинули гипотезу о том, что адроны состоят из точечных частиц с дробными зарядами. Гелл-Манн назвал гипотетические частицы *кварками*, и это название прижилось.

**Гелл-Манн вспоминал, что слово «кварк» он взял из фантастического романа Джойса «Поминки по Финнегану». Там герою снился сон, в котором чайки кричали: «Три кварка для мистера Марка!» Хотя quark с немецкого переводится как творог, в контексте романа это слово означало нечто загадочное. А в первоначальной теории кварков действительно было три. Впоследствии число кварков пришлось увеличить до шести, чтобы объяснить все многообразие вновь открытых адронов.**

В 1969 году на ускорителе в Стэнфорде в опытах по рассеянию сверхбыстрых электронов нуклонами было обнаружено, что внутри протона и нейтрона имеются три точечных рассеивающих центра: снаряды-электроны, натываясь на них, отскакивали, как альфа-частицы от ядер в опытах Резерфорда.

Кварковая гипотеза объяснила всё многообразие известных адронов и предсказала существование новых. Все ее предсказания замечательно подтвердились.

Итак, на настоящий момент известно шесть типов кварков (вместо слова «типы» физики говорят «ароматы»; как вы увидите, при описании кварков физики вообще оказались очень поэтичными). Три аромата имеют заряд плюс  $2/3$  (в долях элементарного заряда  $e$ ) и три — заряд минус  $1/3$ . Кроме того, есть шесть антикварков, которые отличаются знаками заряда.

Кварки, как и лептоны, — это фундаментальные частицы, не имеющие собственного размера и структуры. Красиво получилось, что и тех, и других — шесть видов.

Перечислим все шесть ароматов кварков.

Кварки с зарядом  $+2/3$  называют верхними, это:

- *u*-кварк (от *англ.* up — вверх) — верхний;

- *c*-кварк (от англ. charm – очарование) – очарованный;
- *t*-кварк (от англ. truth – истина) – истинный.

Кварки с зарядом  $-1/3$  называют нижними, это:

- *d*-кварк (от англ. down – вниз) – нижний;
- *s*-кварк (от англ. strange – странный) – странный;
- *b*-кварк (от англ. beauty – красота) – прелестный.

Как и лептоны, кварки делят на три поколения: каждое следующее поколение всё более массивное и всё менее стабильное. Таблица кварков выглядит следующим образом:

Верхние кварки, $+2/3$	<i>u</i> (верхний)	<i>c</i> (очарованный)	<i>t</i> (истинный)
Нижние кварки, $-1/3$	<i>d</i> (нижний)	<i>s</i> (странный)	<i>b</i> (прелестный)
	<i>I</i> поколение	<i>II</i> поколение	<i>III</i> поколение

Все фундаментальные частицы – как лептоны, так и кварки – имеют спин  $1/2$ .

Кварки участвуют во всех фундаментальных взаимодействиях: слабом, сильном, электромагнитном.

За счет сильного взаимодействия кварки объединяются в адроны.

*Барионы* состоят из трех кварков и поэтому имеют полуцелый спин.

*Мезоны* состоят из одного кварка и одного антикварка и поэтому имеют целый спин.

Всё вещество окружающего мира состоит из фундаментальных частиц первого поколения: кварков *u*, *d* и электронов. Легко догадаться, что кварковый состав протона – *uud* (просто просуммируйте заряды этих кварков), а состав нейтрона – *udd*.

А теперь приступим к описанию того, как происходят фундаментальные взаимодействия, и начнем с электромагнитного.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

В том, что электромагнитное поле существует и переносит энергию, мы уверены после открытия электромагнитных волн Генрихом Герцем в конце XIX века. Но *что* же представляет собой это поле,

в классической физике оставалось совершенно неясным. (Люди зачастую научаются использовать вещи, не понимая, что они собой представляют.) Лишь квантовая теория разгадала тайны полей.

Квантовая теория электромагнитных взаимодействий была создана первой, к началу 1950-х. Она называется *квантовой электродинамикой*. Затем были построены квантовые теории сильного и слабого взаимодействий (что касается гравитации, то ее квантовой теории нет до сих пор).

Переносчиками любых взаимодействий являются кванты полей, которые называют также частицами-переносчиками. Частицы-участники обмениваются квантами полей друг с другом — это, грубо говоря, и есть взаимодействие. Квантами (переносчиками) *электромагнитного* поля являются *виртуальные фотоны*. Взаимодействие между заряженными частицами является результатом обмена фотонами: каждая из частиц испускает виртуальные фотоны, которые затем поглощаются другой частицей (если же другой частицы нет, то поглощаются ею самой).

Виртуальные фотоны, как любые виртуальные частицы, рождаются в соответствии с соотношением неопределенностей, разлетаются от частицы-источника во все стороны со скоростью света, и чем меньше энергия фотона, тем дольше его время жизни и тем дальше он успевает улететь. Поэтому электромагнитное взаимодействие не имеет границ, хотя и ослабевает с расстоянием.

Электромагнитное поле состоит не только из виртуальных фотонов: «по дороге» фотон может родить виртуальную электронно-позитронную пару. Образно говоря, электромагнитное поле представляет собой «суп» из непрерывно рождающихся и исчезающих виртуальных фотонов и электронно-позитронных пар. Чем «гуще суп», тем сильнее поле.

## ЦВЕТОВОЙ ЗАРЯД КВАРКОВ

В 1970-х годах была построена теория сильного взаимодействия кварков, которая называется *квантовой хромодинамикой*.

В основе квантовой хромодинамики лежит постулат: кварк любого аромата обладает особым зарядом, который и обеспечивает его участие в сильном взаимодействии — точно так же, как электрический заряд обеспечивает участие в электромагнитном взаимодействии. Этот

особый заряд называли цветовым, или просто цветом. Термин «цвет», конечно же, не имеет никакого отношения к оптическим цветам (как и термин «аромат» — к запахам). В сильном взаимодействии цветовой заряд играет роль, аналогичную электрическому заряду как источнику электромагнитного поля.

Электрический заряд, как мы помним, бывает положительным и отрицательным, и при соединении равных количеств «плюсов» и «минусов» происходит нейтрализация заряда. Можно назвать «плюс» и «минус» «зарядом» и «антизарядом». Такая же ситуация наблюдается и с цветовым зарядом: есть цвет и антицвет. Суммарный цветовой заряд, как и электрический, в изолированной системе сохраняется.

Но, в отличие от электрического заряда, цветовых зарядов имеется три вида (и соответственно три антицвета). Эти три вида цветового заряда называли красным (R), синим (B) и зеленым (G). Каждый цвет имеет дополнение в виде своего *антицвета*: антикрасный ( $\bar{R}$ ), антисиний ( $\bar{B}$ ), антизеленый ( $\bar{G}$ ).

Каждый кварк может иметь любой из трех цветов. Антикварки обладают антицветом.

Барионы состоят из трех кварков *разного цвета* — говорят, что барион *бесцветен* (это напоминает то, как в оптике сумма трех основных цветов дает белый цвет).

Мезоны тоже бесцветны, потому что составляющая мезон пара кварк-антикварк несет любой цвет и его антицвет (например,  $R\bar{R}$ ).

## СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КВАРКОВ

Цветовой заряд является источником особого поля — цветового, состоящего из частиц-переносчиков сильного взаимодействия. Этих переносчиков называют **глюонами** (*от англ. glue — клей*).

Глюоны не имеют ни массы, ни электрического заряда. Каждый глюон несет цветовой заряд «цвет — антицвет», причем возможны все комбинации любого цвета и любого антицвета (например,  $R\bar{G}$ ,  $R\bar{B}$ ,  $G\bar{B}$  и т.д.)

Испуская и поглощая глюоны, кварки *меняют цвет*. Например, красный кварк, испуская глюон с цветом  $R\bar{B}$ , отдает ему свой красный цвет и превращается в синий кварк, так что суммарный цветовой заряд сохраняется:  $R = RB + B$ . Синий кварк, поглотив такой глюон, превращается в красный кварк.

Кварки внутри адронов всё время обмениваются глюонами и меняют свои цвета («мерцают»), не нарушая при этом бесцветности адронов.

Но не только кварки могут испускать глюоны. Поскольку глюон не имеет цветовой заряд, он способен сам излучить и поглотить другой глюон. Аналогов этому процессу (чтобы частицы-переносчики одновременно являлись и участниками) в других типах взаимодействий нет.

Глюонное поле склеивает кварки в адронах.

Но глюоны также стремятся соединиться друг с другом. Поэтому глюоны внутри адронов не рассеиваются в пространстве, подобно облакам, а образуют «глюонные струны» между кварками. Это приводит к уникальным свойствам сильного взаимодействия, отличающим его от других фундаментальных взаимодействий.

Одним из таких свойств является *конфайнмент* (от англ. confinement — пленение, заключение). **Кварки и глюоны никогда не наблюдаются в свободном состоянии.** Все поиски их на ускорителях или в космических лучах оказались безуспешны. Кварки и глюоны заключены в адроны, как в темницу. Почему?

Причиной конфайнмента является необычное свойство взаимодействия между кварками и между глюонами: оно возрастает с увеличением расстояния между частицами. При малых расстояниях (меньших размера адрона) силы притяжения малы, так что кварки внутри адрона являются практически свободными (как мухи в стакане). Образно говоря, глюонные струны на малых расстояниях «провисают» и кварки внутри адронов обретают способность двигаться независимо друг от друга.

Если же расстояние между кварками возрастает, то глюонная струна растягивается, ее энергия возрастает, и кварки испытывают всё более сильное притяжение. (Такую же ситуацию мы наблюдаем с механической пружиной.) Чтобы всё сильнее растягивать глюонную струну, требуется всё большая энергия. Когда подведенная энергия становится достаточно большой, струна разрывается, и на ее оборванных концах рождается новая пара «кварк — антикварк». «Старые» и «новые» кварки мгновенно группируются в новые адроны. Поэтому при столкновениях адронов с большой энергией не удастся «выбить»

из них свободные кварки и глюоны — вместо этого происходит рождение новых адронов.

**И всё же на Большом адронном коллайдере, сталкивая встречные пучки тяжелых ионов с огромными энергиями, удалось получить капли кварк-глюонной плазмы — состояния, когда кварки и глюоны из адронов освободились и перемешались на короткое время. Ученые полагают, что в истории Вселенной существовал краткий период, когда температура и плотность были столь велики, что кварки и глюоны не успевали объединяться в адроны и образовывали кварк-глюонную плазму.**

## СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Слабое взаимодействие осуществляется виртуальными частицами-переносчиками, которые называются *промежуточными бозонами*.

Таких переносчиков три типа:  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ . Два бозона несут электрический заряд, численно равный заряду электрона, а третий электронейтрален.  $W$ -бозоны названы по первой букве английского названия взаимодействия: weak (слабое),  $Z$ -бозон получил свое имя от слова zero (ноль).

$W^+$  является античастицей для  $W^-$ ,  $Z$ -бозон не имеет античастицы (как и фотон, он истинно нейтрален). Все три бозона имеют огромные массы: в 80–90 раз больше массы протона, то есть почти как атомы середины таблицы Менделеева! Из-за этого они очень короткоживущие: соотношение неопределенностей допускает при таких массах время жизни порядка  $10^{-25}$  с.

Чрезвычайно малый радиус действия слабого взаимодействия (порядка  $10^{-18}$  м) связан именно с огромными массами частиц-переносчиков, ведь за время своей короткой жизни переносчик просто не успевает сильно удалиться от частицы-родителя.

Как любые виртуальные частицы промежуточные бозоны могут стать реальными, если сообщить им энергию, превышающую энергию покоя  $mc^2$ . Так, эти частицы были обнаружены в 1982–1983 годах на ускорителе.

Виртуальные  $W$  и  $Z$ -бозоны испускаются как лептонами, так и кварками — ведь те и другие участвуют в слабом взаимодействии.

Что касается лептонов, то *слабое взаимодействие приводит к превращению одних лептонов в другие*. Вот как это происходит.

Допустим, мюон  $\mu^-$  испустил виртуальный  $W^-$  бозон. Отдав ему свой электрический заряд (закон сохранения заряда даже при виртуальных процессах никогда не нарушается), мюон превратился в мюонное нейтрино. Виртуальный  $W^-$  бозон вскоре распадается на электрон и электронное антинейтрино. Мы регистрируем общий итог процесса: распад мюона на электрон и два нейтрино. Аналогичным образом распадается таон.

**Процесс распада мюона можно записать в виде уравнений реакций, как в химии. Первый шаг:  $\mu^- \rightarrow W^- + \nu_{\mu^-}$ , второй шаг:  $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ . Итог описывается уравнением:  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu^-}$ .**

Что касается кварков, то *слабое взаимодействие приводит к изменению аромата кварка*. Когда кварк испускает виртуальный  $W$ -бозон, он меняет свой электрический заряд и, следовательно, аромат: верхний кварк превращается в нижний, и наоборот. Например, верхний  $u$ -кварк (заряд  $+2/3$ ), родив виртуальный бозон  $W^+$ , превращается в нижний  $d$ -кварк (заряд  $-1/3$ ):  ${}_{+2/3}u \rightarrow {}_{-1/3}d + W^+$ . Виртуальный  $W^+$  бозон вскоре распадается на позитрон и электронное нейтрино:  $W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ . В итоге мы наблюдаем изменение аромата кварка и появление позитрона с нейтрино:  ${}_{+2/3}u \rightarrow {}_{-1/3}d + e^+ + \nu_e$ .

Если этот процесс происходит внутри протона (кварковый состав которого  $uud$ ), то после превращения одного из  $u$ -кварков в  $d$ -кварк получится нейтрон (кварковый состав которого  $udd$ ). Протон может превратиться в нейтрон только внутри ядра — это будет позитронный бета-распад. А нейтрон может превращаться в протон и в ядре, и в свободном состоянии — ведь он тяжелее протона, и избыток (по сравнению с протоном) его энергии покоя переходит в кинетическую энергию вылетающих лептонов.

**Слабое взаимодействие играет очень важную роль в природе. Так, без него погасло бы Солнце, так как внутри него остановился бы процесс превращения четырех**

протонов в ядро гелия-4, являющийся основным источником энергии Солнца. В солнечном протон-протонном цикле 1-я стадия — это реакция слияния двух протонов и образование ядра дейтерия. Она происходит в два этапа. Сначала два протона образуют ядро гелия-2 (или дипротон), затем один из протонов путем позитронного распада превращается в нейтрон, так что получается ядро дейтерия (один протон и один нейтрон). Потом уже два ядра дейтерия объединяются в ядро гелия-4. Однако превращение протона в нейтрон за время существования дипротона является крайне редким событием. Чаще всего дипротон просто распадается на два протона. Поэтому 1-я стадия протон-протонного звездного цикла очень медленная. Благодаря этому Солнце «сжигает» свой водород постепенно и горит долго.

## БОЗОН ХИГГСА — ПОСЛЕДНЕЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

В июле 2012 года произошло долгожданное событие: на Большом адронном коллайдере было накоплено достаточно данных, подтвердивших существование так называемого *бозона Хиггса*.

Дело в том, что в Стандартной модели предполагается, что существует особое вездесущее *хиггсовское поле* и что кварки и лептоны обретают массу за счет взаимодействия с этим полем. Предсказал это поле ныне здравствующий британский ученый Питер Хиггс в 1964 году. А бозон Хиггса  $X$  — не что иное, как квант этого поля. Это была единственная частица Стандартной модели, которая оставалась необнаруженной.

Масса бозона  $X$ , согласно экспериментальным данным, весьма велика — примерно в 135 раз больше массы протона (поэтому, для того чтобы обнаружить его рождение, понадобилось строить Большой адронный коллайдер). Через короткое время бозон Хиггса распадается на пару «кварк — антикварк», или на две пары «лептон — антилептон», или на два фотона.

Хиггсовское поле пронизывает всё сущее, и все фундаментальные частицы — кварки и лептоны, а также промежуточные бозоны взаимо-

действуют с этим полем и поэтому обладают массой. Фотоны и глюоны не взаимодействуют напрямую с хиггсовским полем и остаются безмассовыми.

Хиггсовское поле отличается от всех других известных нам полей. Электромагнитное, слабое, сильное поля так или иначе выделяют определенное направление в пространстве. Такие поля называют векторными, а их квантами являются частицы со спином 1. А поле Хиггса не выделяет никакого направления в пространстве, и его кванты имеют нулевой спин. Такое поле называют скалярным. Существенно, что даже в состоянии вакуума это поле присутствует и называется на движении частиц определенным образом: оно затрудняет *ускорение* частиц, но не мешает их равномерному движению. А ведь именно ускорение связано с массой. Из-за взаимодействия с хиггсовским полем частицы становятся инертными — иными словами, у них появляется *масса*.

**Простые механические аналогии могут пояснить, почему при движении частицы сквозь какую-то среду может появиться инертность. Возьмем кусок пенопласта и покрошим его на стол. Получившиеся маленькие пенопластовые шарики очень легкие. Если подуть на них — они разлетятся. Это аналоги безмассовых частиц, то есть частиц, у которых отсутствует инертность. Теперь поместим эти шарики на поверхность воды и снова слегка подуем на них. Шарики отплывают, но уже медленнее. Если бы мы не видели воду, нам бы казалось, что у них появилась инертность, которой раньше не было. Она возникает из-за взаимодействия с водой, которая в этой аналогии играет роль вакуумного хиггсовского поля. Если же подуть на воду без пенопластовых шариков, то по ее поверхности побежит рябь — это будет аналог хиггсовских бозонов. Неточность этой аналогии заключается в том, что вода мешает движению шариков, а хиггсовское вакуумное поле мешает только ускорению частиц.**

Экспериментальное обнаружение существования бозона Хиггса (достоверность этого оценивают как 99,99%) подтверждает, что Стандартная модель верно описывает микромир.

\* \* \*

До сих пор все предсказания Стандартной модели доказывались экспериментами, иногда с фантастической точностью в миллионные доли процента.

Однако эта модель не дает ответа на многие вопросы: почему частиц именно столько и именно таких? Откуда взялись именно эти взаимодействия и именно с такими свойствами? Зачем природе понадобилось создавать три поколения фундаментальных частиц? Почему численные значения параметров частиц (масс, спинов, зарядов и т. д.) именно такие? Кроме того, Стандартная модель не способна описать некоторые явления, наблюдаемые в мире (например, отсутствие антивещества во Вселенной).

Сегодня уже понятно, что нарисованная Стандартной моделью картина строения материи не является полной. В частности, в ней нет места частицам темной материи, существование которых доказано в космологии (см. след. часть книги).

Очевидно, что Стандартная модель не может являться последним словом в фундаментальной физике.

## **ГЛАВА 4. ЗА ПРЕДЕЛЫ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ**

### **ПЛАНКОВСКАЯ ДЛИНА И ПЛАНКОВСКОЕ ВРЕМЯ**

Есть ли у природы следующий, ещё более глубокий структурно-иерархический уровень, и каковы его масштабы? На сегодня нам доступны наименьшие расстояния порядка  $10^{-18}$  м (одна миллиардная от одной миллиардной доли метра). Это в тысячу раз меньше размера нуклона, и это тот предел, до которого мы можем проверить выводы теорий в эксперименте.

Но физики-теоретики не сидят без дела и строят гипотетические теории того, как может быть устроен следующий структурно-иерархический уровень организации материи. Проблема сейчас не в том, что ни-

кто не может построить новой теории, а в том, что вариантов теорий слишком много, а эксперимент пока не позволяет «отделить зерна от плевел».

Интересно, что масштаб следующего уровня (названия которому ещё не дали) уже понятен. Предполагают, что в природе есть минимальный размер — «квант длины», меньше которого не может быть ни объектов, ни расстояний, и этот квант — так называемая *планковская длина*. Эту величину получил Макс Планк ещё в начале XX века из соображений размерности, комбинируя фундаментальные константы: гравитационную постоянную, скорость света и постоянную Планка. Планковская длина составляет около  $10^{-35}$  м. Это во столько же раз меньше достигнутого предела расстояний, во сколько последний меньше размера человека. Для выхода на такие масштабы нам потребовался бы ускоритель размером с Галактику!

$$\text{Планковская длина } l_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 1,6 \times 10^{-35} \text{ м,}$$

где  $G$  — гравитационная постоянная,  $c$  — скорость света,

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$  — постоянная Планка.

$$\text{Планковское время } t_p = \frac{l_p}{c} = 5 \times 10^{-44} \text{ с.}$$

**Из тех же мировых констант по тому же принципу размерностей можно вычислить также планковскую энергию, планковскую массу и планковскую температуру.**

Полагают, что именно такого — планковского — размера была только что родившаяся Вселенная. Представляется вероятным, что и размеры фундаментальных частиц того же порядка.

Из тех же фундаментальных констант можно составить комбинацию с размерностью времени — это будет *планковское время*. С этого момента в космологии начинают счет времени. Величина его порядка  $10^{-44}$  с.

Одним из перспективных кандидатов на роль «теории всего сущего», описывающей самый глубинный уровень организации материи, является теория струн. Математически она чрезвычайно сложна (и недоступна даже большинству физиков). Попытаемся объяснить ее «на пальцах».

**После 1971 года просто «струны» переименовали в «суперструны». Это произошло после того, как в теорию был введен особый принцип «суперсимметрии», связанный со спином. Мы не будем заострять на этом отличии внимание.**

## **В ЧЕМ СУТЬ ТЕОРИИ СТРУН?**

Стандартная модель представляет фундаментальные частицы как точечные объекты. Теория струн описывает их как протяженные объекты — некие струны, подобные тончайшим волокнам или лентам. Их размеры — масштаба планковской длины, то есть порядка  $10^{-35}$  м. Все струны одинаковы, а все наблюдаемые частицы и кванты полей суть различные типы колебаний этих струн.

Струна принципиально не может иметь размер меньше планковской длины. В теории точечных частиц физики привыкли, что, чем больше энергия частицы, тем в меньшей области пространства частица может быть локализована. Совсем иное дело со струнами: дополнительная энергия приводит не к уменьшению, а к увеличению размера струны. Поэтому расстояние, которое меньше планковской длины, принципиально недостижимо.

Струны бывают открытыми и замкнутыми. И те и другие имеют определенные устойчивые формы колебаний — моды. Механическая аналогия: зажимая по-разному скрипичные струны, можно извлекать самые разные звуки. Каждая колебательная мода струны соответствует той или иной частице и обеспечивает ей все наблюдаемые характеристики: массу, спин, заряд и пр. Причем не только частицы-участницы, но и частицы-переносчики взаимодействий предстают «на равных» в теории струн. Абсолютно все частицы могут быть описаны через единый объект — струну.

Это же самое полное воплощение мечты о единстве мира!

Все известные нам частицы и переносчики взаимодействий — колебательные моды с наименьшей энергией. Хотя число различных колебательных мод бесконечно, лишь немногим из них соответствуют малые массы и заряды. Остальные должны иметь гигантские массы порядка  $10^5$  граммов — это огромная величина в масштабах микромира! На наших ускорителях родить таких гигантов мы ещё долго не смо-

жем. Но они рождались на ранних стадиях Вселенной, когда энергия была в избытке.

Теория струн естественно включает в себя и гравитацию с ее гипотетическим переносчиком – гравитоном. Вместо четырех фундаментальных взаимодействий она предлагает единое взаимодействие струн.

Простейшее струнное взаимодействие – это разрыв и слияние струн. Скажем, две замкнутые струны объединяются в промежуточную замкнутую струну, которая потом опять распадается на две, но уже другие струны.

## МНОГОМЕРНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Струны в очередной раз изменили наши представления о пространстве.

Предыстория этого начиналась в 1919 году.

Дело в том, что, хотя Эйнштейн и сформулировал общую теорию относительности для трехмерного пространства, математический формализм его теории легко обобщить на случай многомерных пространств. В 1919 году малоизвестный польский математик Теодор Калуца записал уравнения Эйнштейна для четырехмерного пространства и обнаружил, что, помимо обычных уравнений Эйнштейна, получились дополнительные уравнения, которые совпали с уравнениями Максвелла! В четырехмерном пространстве гравитация объединилась с электродинамикой!

Казалось бы, какая польза от этого открытия? Ведь мы-то знаем, что наше пространство трехмерно, и Эренфест разъяснил, почему: потому что устойчивые орбиты планет при другом числе измерений невозможны.

Но вскоре шведский математик Клейн придумал, как избавиться от лишнего измерения: дополнительное пространственное измерение может быть свернутым. Представить, что это значит, нам поможет аналогия с махровой простыней: издали она кажется двумерной, но в каждой точке плоскости есть петелька – выход в третье измерение. Клейн сделал оценки и получил, что дополнительное измерение может иметь протяженность порядка планковской длины.

Теория Калуцы – Клейна намного опередила развитие физики. Ее забыли на несколько десятилетий и воскресили в 1970-х, когда ученые

осознали, что введение нескольких дополнительных пространственных измерений позволяет объединить все четыре фундаментальных взаимодействия в единое взаимодействие. Сегодня считается, что всего нужно девять или десять пространственных измерений (и одно временное). При этом шесть или семь дополнительных измерений свернуты до планковского размера. Из-за малости этого размера они становятся абсолютно незаметными не только для глаза, но и для элементарных частиц на современных ускорителях. С точки зрения наших измерительных устройств мы получаем привычное трехмерное пространство, в каждой точке которого спрятано крохотное шести- или семимерное пространство, подобно петельке на махровой простыне.

Хотя свернутые измерения и малы для прямого обнаружения, тем не менее столь же малые струны могут перемещаться и колебаться в этих измерениях. То есть струны многомерны, в отличие от нас, трехмерных.

Кроме того, струны могут «наматываться» на свернутое измерение. Это приводит к появлению так называемых оборотных мод колебаний. Замкнутая струна может обернуться вокруг компактного измерения даже несколько раз. При столь малых размерах дополнительных измерений оборотные моды становятся очень легкими — эти моды и есть известные нам частицы.

## ТОПОЛОГИЯ СВЕРНУТЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Дополнительные измерения в теории струн должны быть свернуты определенным образом. Что это значит? У махрового полотенца только одно дополнительное измерение, свернутое в петельку. При наличии двух дополнительных измерений они могли бы свернуться в крохотную сферу, или бублик (то есть тор). Принципиальное отличие тора от сферы — наличие отверстия. Можно представить себе двумерную поверхность с двумя или тремя отверстиями.

Согласно теории струн, прячущееся в каждой точке обычного пространства шестимерное свернутое пространство обладает очень непростыми свойствами (математики называют эти свойства *топологией* пространства). Топология пространства имеет самое непосредственное отношение к параметрам частиц: массам, зарядам, спинам, а также к числу поколений частиц. Оказывается, число поколений равно

числу отверстий в свернутом пространстве — ведь струны наматываются на свернутые измерения. Так что уже известно, что свернутое пространство имеет три отверстия.

Итак, именно геометрия дополнительных измерений определяет фундаментальные свойства нашего мира. Это внушает надежду, что теория струн сможет вывести все фундаментальные константы из самой теории (как, например, скорость света однозначно определяется уравнениями Максвелла), а не будет вводить их извне, как это делается в Стандартной модели.

Проблемой, однако, является то, что существуют десятки тысяч вариантов пространств с тремя отверстиями, и пока неясно, какое из них надо использовать для описания мира, в котором мы живем. Перебор всех вариантов — слишком долгий и трудоемкий процесс. Не хватает ещё каких-то подсказок. Но теоретики не теряют надежды найти эту единственно правильную топологию свернутых измерений.

## **ЧТО ТАКОЕ ПРОСТРАНСТВО?**

Теория струн не только «сделала» наше пространство многомерным. Она заставила ещё раз задуматься о том, что же это вообще такое — пространство-время.

Наше обычное восприятие невозможно без использования образов пространства и времени. Все физические теории, начиная с механики Ньютона и кончая современным вариантом теории струн, заранее предполагают существование пространства-времени как некой реальности, в которую погружены объекты — частицы классической механики или струны в теории струн. Но уже сейчас понятно, что такое представление слишком упрощает дело в пользу наглядности.

Теория струн постепенно рождает новый образ: струны — это нити, из которых соткана ткань пространства-времени. Более научно можно сказать, что особое согласованное состояние колеблющихся синхронным образом струн формирует структуру пространства-времени.

Вероятно, пространство-время сформировалось вскоре после Большого взрыва, когда создающие структуру пространства-времени струны включились в упорядоченный танец колебаний, а до этого момента пространства-времени не существовало.

Сейчас теоретики бьются над важнейшей задачей: поиском математической формулировки теории струн без обращения к изначальному понятию пространства-времени.

\* \* \*

Для понимания физических законов макромира понадобилось три столетия развития классической физики. Квантовая физика смогла описать уровень микромира всего за сто лет. Интересно, сколько времени потребуется физикам и математикам на постижение законов «планковского уровня» (назовем так Вселенную масштаба планковской длины, за неимением общепринятого термина)?

И действительно ли это последний, самый глубинный структурный уровень организации материи? Сегодня мы не знаем ответа на этот вопрос.

Физика в XXI веке представляется гораздо дальше от своего завершения, чем это казалось в конце XIX века. И возможно ли вообще завершение?

# ЧАСТЬ 4. МЕГАМИР

*Устройство Вселенной волнует любого думающего человека.  
К тому же мы живем в очень интересную эпоху, когда на  
наших глазах происходят удивительные открытия.  
Свойства и эволюцию Вселенной изучает наука космология –  
детище физики и астрономии.*

# ГЛАВА 1.

## НАША ВСЕЛЕННАЯ

### СТРУКТУРА НАБЛЮДАЕМОЙ ВСЕЛЕННОЙ

Вселенная возникла примерно 13,8 млрд лет назад в результате так называемого Большого взрыва. Конечное время жизни Вселенной означает, что, как бы велика она ни была, информация может прийти до нас лишь из областей, удаленных не более чем на 13,8 млрд световых лет (порядка  $10^{26}$  м). Эта часть Вселенной *в принципе* наблюдаема, и ее называют Метагалактикой. Современным наблюдениям доступен объем пространства радиусом около 13 млрд световых лет, то есть мы «освоили» почти всю Метагалактику!

Что же представляет собой наблюдаемая Вселенная?

Если рассматривать ее в масштабе миллиардов световых лет, то Вселенная выглядит однородной и изотропной, то есть в любых местах и по любым направлениям ее свойства одинаковы. Это утверждение называется *космологическим принципом*.

**Расстояния во Вселенной измеряют в световых годах. Один световой год — это расстояние, которое свет проходит за один земной год, и равно оно примерно  $9,5 \times 10^{15}$  м.**

Но в сравнительно небольших масштабах материя во Вселенной распределена крайне неравномерно. Звезды собираются в галактики (их более 500 млрд), галактики образуют скопления из сотен и тысяч объектов; десятки скоплений, в свою очередь, группируются в сверхскопления.

**Типичное расстояние между галактиками в скоплениях —  $5^{-10}$  млн световых лет. Если учесть, что размеры самих галактик — от 15 до 800 тыс. световых лет, то оказывается, что они расположены гораздо «теснее», чем звезды в окрестностях Солнца (диаметр звезды пренебрежимо мал по сравнению с расстояниями до ближайших соседей, до которых — несколько световых лет).**

До недавнего времени считалось, что сверхскопления галактик являются максимальными структурными образованиями во Вселенной. Но к 1997 году, когда смоделировали на компьютере трехмерную карту распределения галактических скоплений, обнаружилось, что они выстраиваются в ячеисто-сетчатую структуру, подобную гигантским трехмерным кружевам. Характерные размеры ячеек — 300–500 миллионов световых лет. Внутри этих ячеек галактик практически нет, все они располагаются на стенках ячеек. Ячейки и пустоты между ними — это самые большие структурные образования в Метагалактике.

В мегамире царит гравитация, все остальные взаимодействия здесь не проявляются. Ньютоновской теории тяготения вполне достаточно для описания взаимодействия звезд, галактик и даже галактических скоплений. Но для понимания эволюции всей Вселенной нужна общая теория относительности Эйнштейна.

Подобраться же к моменту Большого взрыва может только квантовая физика.

## **КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФРИДМАНА**

На протяжении двух тысяч лет, со времен Аристотеля, идея вечной и неизменной Вселенной казалась само собой разумеющейся. Во Вселенной могут происходить сложнейшие процессы, но откуда и куда ей эволюционировать?

Сразу после построения общей теории относительности Эйнштейн стал искать у своих уравнений, примененных к Вселенной в целом, стационарные решения, т. е. такие, которые описывают состояния, не меняющиеся со временем. Но уравнения не давали таких решений! Эйнштейн не поверил своим уравнениям и стал их изменять.

Российский математик Александр Фридман в 1922–1924 годах первым решился отказаться от попыток «сделать» Вселенную стационарной. Он честно решил уравнения общей теории относительности для однородной и изотропной (в среднем) Вселенной и доказал, что Вселенная не может находиться в покое и должна либо расширяться, либо сжиматься.

Фридман выделил три возможных сценария эволюции Вселенной.

1. Расширение, которое постепенно замедляется и в некоторый момент сменяется сжатием.

Можно провести такую механическую аналогию: бросаем тело с Земли вверх со скоростью меньше второй космической: на некоторой высоте тело остановится, а потом за конечное время упадет обратно.

При этом сценарии Вселенная в любой момент времени имеет конечный объем (так называемый *закрытый мир*), и ее пространство искривлено — подобно тому, как искривлена двумерная поверхность сферы (такую кривизну математики считают положительной).

**Вторая космическая скорость, или скорость убегания, — это минимальная скорость, которую необходимо сообщить телу на поверхности Земли (или другой планеты), чтобы оно могло ее покинуть и улететь бесконечно далеко. Для Земли эта скорость равна 11,2 км/с. Такая скорость нужна, например, чтобы лететь на Луну.**

2. Вселенная расширяется бесконечно долго, скорость расширения всё время уменьшается, постепенно стремясь к нулю.

Механическая аналогия: тело брошено со второй космической скоростью (не важно, вверх или под углом к горизонту). Оно улетит бесконечно далеко по параболической траектории (поэтому вторую космическую скорость называют также параболической).

При этом сценарии Вселенная имеет бесконечные размеры, а ее пространство является плоским, то есть описывается знакомой вам из школы геометрией Евклида, — это так называемый *открытый параболический мир*.

3. Вселенная всегда будет расширяться. Скорость расширения со временем уменьшается, но не стремится к нулю.

Механическая аналогия: бросаем тело со скоростью больше параболической и, улетев бесконечно далеко, оно сохраняет конечную скорость. Траектория такого тела — гипербола.

В космологии такую модель мира называют *открытой гиперболической*. Открытой — потому что размеры Вселенной, как и во второй модели, бесконечны, а пространство искривлено подобно тому, как искривлена двумерная поверхность седла (такую кривизну считают отрицательной).

Все три сценария имеют начало, но только один сценарий имеет конец. Какой же именно из них реализуется в нашем мире? Что происходит с Вселенной в настоящий момент, на какой стадии находится «представление» и чем оно завершится? Об этом далее.

## **ЗАКОН ХАББЛА: РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ**

В 1929 году, спустя семь лет после работы Фридмана и, увы, уже после его смерти, астроном Эдвин Хаббл смог впервые измерить расстояния до десятков галактик. Он сопоставил эти расстояния с лучевыми скоростями галактик (то есть с проекциями их скоростей на прямые, соединяющие галактики с наблюдателем) и обнаружил, что чем дальше от нас галактики, тем быстрее они удаляются от нас. То есть галактики разбегаются и Вселенная расширяется!

**Для измерения лучевых скоростей в астрономии используют эффект Доплера: если светящийся объект движется с лучевой скоростью  $v$ , то воспринимаемая нами длина волны его излучения изменяется, причем относительное изменение длины волны равно отношению лучевой скорости к скорости света:  $\Delta\lambda/\lambda = \pm v/c$ . Если объект движется от нас, то длина волны возрастает (то есть свет «краснеет»), а при движении к нам длина волны уменьшается (свет «синееет»). Так вот, спектры излучения всех далеких галактик смещены в красную сторону — этот эффект назвали красным смещением.**

Хаббл установил, что *скорость убегания галактик пропорциональна расстоянию до них*. Математически этот закон Хаббла формулируется очень просто:

$$v = H \times R$$

где  $v$  — скорость удаления галактики от нас,  $R$  — расстояние до нее, а  $H$  — так называемая *постоянная Хаббла*, которая определяется экспериментально (и ее значение постоянно уточняется). Галактики, удаленные от нас на расстояние 1 млн световых лет, убегают со скоростью около 20 км/с, на 100 млн световых лет — со скоростью, в 100 раз большей. Постоянная Хаббла  $H$  играет огромную роль

в космологии: именно она определяет возраст Вселенной, поэтому ее стараются измерить как можно точнее.

Закон Хаббла не означает, что Солнечная система (или наша Галактика) — центр мироздания. Разбегание галактик выглядит совершенно одинаково из любой точки Вселенной! Расширяется сама ткань мирового пространства, и все галактики удаляются друг от друга.

Итак, мы точно знаем, что сейчас наш мир находится в стадии расширения. А чтобы узнать его дальнейшую судьбу, надо измерить среднюю плотность материи (включая, конечно, все ее виды) во Вселенной. Но об этом чуть позже.

## **БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ**

Закон Хаббла наводит на мысль: у Вселенной было начало во времени. Чтобы понять это, достаточно мысленно «прокрутить назад» картину наблюдаемого нами расширения Вселенной — и мы дойдем до момента, когда всё вещество было сжато в сверхплотный комок материи.

Следующий после Хаббла важный шаг в космологии сделал Георгий Гамов. Это русский физик, который уже в 28 лет стал академиком, а через год, в 1933-м, эмигрировал из России. В 1946 году Гамов показал, что Вселенная не просто начала расширяться — она должна была взорваться из сверхплотного и сверхгорячего состояния. Это гипотетическое событие назвали Большим взрывом. Его физическая природа до сих пор остается большой загадкой.

Принять эту концепцию ученым было непросто; некоторые астрономы сопротивлялись ей вплоть до середины 1960-х, когда появились новые доводы в пользу теории Большого взрыва. Были открыты явления, которые объяснялись на основе сценария Большого взрыва и никак иначе. Что же это?

Во-первых, когда мощные телескопы смогли заглянуть во Вселенную глубже и таким образом проникнуть в ее прошлое (ведь свет, который пришел к нам от далеких объектов, был испущен много лет назад), стало ясно, что давным-давно Вселенная выглядела иначе, чем сейчас. На расстояниях в несколько миллиардов световых лет мы видим молодые, ещё не сформировавшиеся галактики. Но это

как раз то, что и ожидалось от эволюционирующей Вселенной, и никак не согласуется с картиной вечной и неизменной Вселенной.

Другое открытие, которое убедило самых последних скептиков в реальности Большого взрыва, — это обнаружение *реликтового теплового излучения*.

Сам Гамов указал на способ проверки теории Большого взрыва: если такой взрыв имел место, то уже на ранних стадиях расширения должно было возникнуть пронизывающее весь мир электромагнитное излучение, соответствующее сверхвысокой температуре материи. Но по мере расширения и остывания Вселенной это первичное («реликтовое») излучение тоже должно остывать. К настоящему времени, по оценкам Гамова, температура излучения должна составлять 3–4 градуса Кельвина (около минус 270 градусов Цельсия). Такому излучению соответствует длина волны несколько сантиметров. И в 1964 году американские физики Арно Пензиас и Роберт Уилсон обнаружили тепловое излучение как раз такой длины волны! Оно приходило со всех сторон с одинаковой интенсивностью, куда бы они ни направляли свой радиотелескоп.

И наконец, третье впечатляющее подтверждение — состав вещества во Вселенной.

Ранняя Вселенная была очень горячей. Даже если протоны и нейтроны при столкновениях объединялись в более тяжелые ядра, время их жизни было ничтожным, потому что при новых столкновениях ядро снова распадалось на элементарные частицы. По расчетам Гамова выходило, что с момента Большого взрыва должно было пройти около секунды, прежде чем Вселенная остыла настолько, чтобы частицы начали образовывать устойчивые ядра. Однако этот первичный ядерный синтез продолжался очень недолго: всего три минуты. Вскоре из-за расширения частицы разлетелись так далеко друг от друга, что столкновения между ними стали крайне редкими, и синтез ядер прекратился. В этот краткий период первичного синтеза успели синтезироваться ядра дейтерия и изотопов гелия (было подсчитано, сколько именно). Более тяжелые элементы образуются позже, в недрах звезд.

Когда сравнили прогнозы Гамова с реально наблюдаемым соотношением элементов во Вселенной (с поправкой на их дальнейшее обра-

зование в звездах), то обнаружили полное соответствие между теорией и наблюдениями.

Итак, убедительных аргументов в пользу теории Большого взрыва накоплено более чем достаточно.

А теперь поговорим о том, что ждет нашу Вселенную дальше.

## ГЛАВА 2. ТЕМНЫЕ НЕИЗВЕСТНЫЕ

### ИЗ ЧЕГО СОСТОИТ ВСЕЛЕННАЯ?

Вы помните, что сценарий развития связан со средней плотностью материи? Расчеты показывают, что есть некое *критическое* (для настоящего момента жизни Вселенной) значение *средней плотности материи*. Если плотность больше критической (то есть материи во Вселенной достаточно много), то мир является закрытым и расширение сменится сжатием. Если плотность меньше критической, то мир наш неограничен и будет расширяться всегда. Если плотность в точности равна критической, то при этом мир ещё и плоский.

Каково же значение критической плотности? Согласно расчетам, это  $9,23 \cdot 10^{-27}$  кг/м<sup>3</sup>. Для наглядности: если в среднем в кубометре пространства содержится масса, равная массе 5,5 нуклона, то это и есть критическая плотность. Очень малая величина, не правда ли? Для сравнения: в околоземном космическом пространстве плотность вещества в миллионы раз больше.

Одна проблема: измерить среднюю плотность всей материи, видимой и невидимой, во всей Метагалактике очень непросто.

Для начала попробуем разобраться, из какой материи состоит Вселенная. Казалось бы, простой вопрос: она состоит из галактик, а они, в свою очередь, состоят из звезд и межзвездных облаков пыли и газа. Всё это вещество мы так или иначе регистрируем с помощью приборов. Оно распределено по Вселенной крайне неравномерно, но если усреднить, то получается плотность, едва дотягивающая до нескольких процентов от критической. Она соответствует средней концентрации нуклонов около 1 штуки в 10 м<sup>3</sup>.

Но, оказывается, это наблюдаемое вещество — лишь малая часть (около 5%) того, из чего состоит Вселенная!

## ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Примерно на 95% наш мир состоит из чего-то, о чём мы совсем не знаем.

Часть этой таинственной субстанции назвали *темной материей*, потому что она не излучает, не поглощает и не рассеивает свет, следовательно, невидима. Но именно она своим полем тяготения удерживает галактики в скоплениях и звезды в галактиках. Ее доля в общей массе-энергии Вселенной — около 25%. Без тяготения, создаваемого темной материей, галактики просто не смогли бы сформироваться! Через 300 000 лет после Большого взрыва темная материя первой стянулась под воздействием сил гравитационного притяжения в будущие ядра галактик, а уже на них начали собираться частицы обычной материи.

Темную материю открывали постепенно, накапливая информацию на протяжении десятилетий. К концу XX века ученые уже не сомневались в ее существовании. О чем они, однако, имеют слабое представление, так это о ее природе.

Тайна незначительной части темной материи раскрыта — это вездесущие нейтрино, которые когда-то считались безмассовыми, а теперь признаны имеющими небольшую массу. Холодные мертвые звезды тоже вносят свой скромный вклад в общий зачет.

Но большая часть темной материи состоит, вероятно, из не открытых ещё в земных условиях тяжелых частиц. Как и нейтрино, они участвуют только в слабом взаимодействии (не считая гравитационного), поэтому их так сложно обнаружить. Их принято называть *массивными частицами слабого взаимодействия* (или WIMP — от англ. *Weakly Interactive Massive Particles*). В отличие от нейтрино, они массивные (тяжелее протона) и могут покоиться.

Поиски WIMP ведутся во многих экспериментах на протяжении уже около 30 лет, в том числе на Большом адронном коллайдере, но пока не увенчались успехом.

Если оценить среднюю плотность вещества во Вселенной с учетом темной материи, то в результате получается 20–30% от критиче-

ской плотности, необходимой для перехода Вселенной от расширения к сжатию.

## НОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ В КОСМОЛОГИИ.

### ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Но темная материя — это ещё не все сюрпризы космологии! В 1999 году произошел ещё один космологический переворот.

После революционных работ Фридмана и до конца XX века в космологии речь шла о выборе между тремя основными моделями Вселенной: замкнутой, параболической и гиперболической. Обратим внимание, что в любой из моделей *расширение должно замедляться*. Вопрос стоял так: достаточно ли во Вселенной материи, чтобы со временем расширение сменилось сжатием, или она так и будет расширяться до бесконечности?

Если попытаться измерить это замедление, то можно оценить среднюю плотность материи во Вселенной. Идея такова: наблюдая галактики, удаленные от нас на расстояние в 10 млрд световых лет, мы видим Вселенную такой, какой она была 10 млрд лет назад. В частности, мы видим, с какой скоростью она в то время расширялась. Сравнив эту скорость с текущей скоростью расширения Вселенной (измеренной для более близких галактик), мы можем определить, насколько снизилась эта скорость за несколько миллиардов лет, и рассчитать таким образом замедление. Но беда в том, что у астрономов не было независимого способа измерения расстояний до самых далеких галактик — ведь после открытия закона Хаббла эти расстояния рассчитывали с помощью именно закона Хаббла, предполагая скорость расширения неизменной!

Только к концу XX века удалось, наконец, решить эту задачу. И результаты получились просто ошеломляющие: *расширение Вселенной не замедляется, а убыстряется!*

Единственно возможное объяснение этого ускорения: во Вселенной существует некая субстанция, обладающая антигравитацией. Антигравитация действует на разбегающиеся галактики и стремится ещё более отдалить их друг от друга — из-за этого скорость расширения Вселенной возрастает. Эту таинственную субстанцию назвали *темной энергией*.

Темная энергия равномерно заполняет все пространство Вселенной и создает всемирное антигравитационное тяготение. Обратите внимание: отталкиваются не сами космические тела — их расталкивает среда, в которую они погружены. Самое поразительное, что это всемирное отталкивание *усиливается* с ростом расстояния между телами, в отличие от гравитационного тяготения.

**Чтобы представить себе величину силы всемирного отталкивания, создаваемого темной энергией, вообразим, что два атома водорода помещены в пространство, в котором нет ничего, кроме темной энергии. Антигравитация темной энергии будет сильнее гравитационного притяжения атомов, если расстояние между ними больше полуметра. В окружающем нас космосе в каждом кубическом метре — миллионы атомов, поэтому их обычное притяжение маскирует эффект темной энергии. В ранней Вселенной гравитация тоже была доминирующей силой. Но начиная с какого-то момента из-за расширения Вселенной плотность вещества стала так мала, что антигравитация темной энергии стала преобладать. Мы живем как раз в такую эпоху.**

Есть ещё один аргумент в пользу темной энергии. Тщательное изучение особенностей реликтового теплового излучения приводит к выводу, что мир наш в целом всё же не искривленный, а плоский, как в параболической модели. Но плотности материи (видимой и темной) имеется всего около четверти от критической. Нехватку плотности как раз может восполнить темная энергия.

Природа темной энергии — конечно же, главная загадка физики и космологии XXI века. Уже есть разные теории и догадки на этот счет. Поистине, космология и физика творятся сейчас на наших глазах.

Главный кандидат на роль темной энергии — физический вакуум. Согласно современной квантовой физике, вакуум — отнюдь не пустота, это «нулевые колебания» всех полей. Он имеет определенную

плотность энергии. И вакууму действительно присуща антигравитация. Физический вакуум можно описать как особую сплошную среду, которая равномерно заполняет всю Вселенную и имеет всюду и всегда постоянную плотность, не изменяющуюся при расширении Вселенной, в отличие от плотности вещества. В современном мире плотность энергии вакуума составляет 70–75% от полной плотности энергии Вселенной.

Итак, мы живем в эпоху, когда антигравитация темной энергии уже доминирует над обычным тяготением, Вселенная расширяется ускоряющимися темпами и будет расширяться всё быстрее и быстрее, до бесконечности.

## **ГЛАВА 3. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ВСЕЛЕННОЙ**

### **ОТ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА ДО НАШЕЙ ЭПОХИ**

Итак, примерно 13,8 млрд лет назад произошел Большой взрыв, и 13,8 млрд световых лет — это горизонт видимости во Вселенной. Самые дальние объекты, которые астрономам уже удалось разглядеть, — это несколько звездных скоплений на расстоянии 13,2 млрд световых лет. Таким образом, мы «получили привет» от молодой Вселенной, возраст которой был всего 600 млн лет!

В принципе, мы могли бы заглянуть ещё чуть дальше — вплоть до возраста 379 тыс. лет после Большого взрыва. Почему именно такая цифра? Скоро узнаем.

Современные теории позволяют описать всё, что происходило, начиная от одной сотой секунды от Большого взрыва и до сего дня. Все нужные для этого законы являются надежно установленными, поэтому получаемую с их помощью информацию можно считать вполне достоверной. Принципиальные трудности возникают лишь при попытке продвинуться еще ближе к началу мира, то есть внутри первой сотой доли секунды. Здесь мы выходим за рамки Стандартной модели и попадаем в область гипотетических теорий. И тем не менее научные гипотезы простираются вплоть до  $10^{-35}$  с! Ещё бли-

же к началу мира, возможно, позволит в будущем приблизиться теория суперструн.

Давайте «прокрутим» основные события от Большого взрыва и до нашей эпохи. Итак...

Большой взрыв. По каким бы причинам ни возникла Вселенная, она начинает свою жизнь с планковского размера по всем измерениям (порядка  $10^{-35}$  м) и планковской температуры (порядка  $10^{32}$  К).

В этот начальный момент все девять или десять пространственных измерений свернуты в комок. Но уже через планковский квант времени ( $5 \times 10^{-44}$  с) три пространственных измерения начинают расширяться, а оставшиеся сворачиваются определенным образом (свойства свернутых измерений определяют все фундаментальные константы нашего мира, а значит, и то, какие именно частицы потом в нем рождаются).

Разворачивание трех пространственных измерений подстегивается само собой и становится скачкообразным. Этот этап расширения Вселенной называют *инфляционным*, оно происходит во много раз быстрее обычного хаббловского расширения. Примерно за  $10^{-32}$  секунды Вселенная раздулась в неимоверное число ( $10^{50}$ ) раз.

Поначалу в горячей Вселенной бурно рождаются как частицы, так и античастицы. На каждый миллиард обычных частиц рождается почти столько же античастиц — но всё же на одну меньше. Затем частицы и античастицы аннигилируют, и вся их энергия превращается в излучение. Во Вселенной остается лишь жалкий клочок обычной материи. Из него-то и будут построены в дальнейшем все звезды и галактики.

К концу первой секунды расширения Вселенная остыла настолько, что кварки начинают группироваться в адроны, включая протоны и нейтроны. И с этого же момента начинается первичный ядерный синтез, который продолжается три минуты. Четверть всех ядер, сформировавшихся за это время, — это гелий, немного дейтерия, а остальные три четверти — протоны. Таким и будет состав первых звезд.

Через три минуты Вселенная расширилась настолько, что столкновения ядер, в результате которых могли бы образовываться новые ядра, становятся огромной редкостью, и синтез ядер прекращается.

К исходу первых трех минут Вселенная представляет собой раскаленное до миллиарда градусов море частиц — ядер и лептонов. Высокая температура не позволяет им объединиться в атомы. Это состояние раскаленной плазмы.

В следующие 379 тыс. лет ничего заметного не происходит — Вселенная спокойно расширяется и остывает. В этот период она непрозрачна для излучения, потому что фотоны постоянно рассеиваются на свободных электронах и ядрах. Это похоже на «светящийся туман».

Через 379 тыс. лет Вселенная охладилась достаточно (до 3000 градусов), чтобы из ядер и электронов могли образоваться нейтральные атомы. Среда становится прозрачной для света и остается таковой до сих пор. Говорят, что в этот момент излучение отделилось от вещества: с тех пор излучение расширяется и остывает само по себе, а вещество эволюционирует само по себе. Реликтовое тепловое излучение с характерной длиной волны около 4 см — это и есть то самое отделившееся излучение.

После отделения излучения от вещества началась темная эпоха — звезд ещё не было, и светить было нечему. На протяжении сотен миллионов лет вещество стягивалось к местам случайных первоначальных сгустков темной материи.

Через 600 млн лет после Большого взрыва стали формироваться галактики. Плотные и холодные облака газа сжимались, разогреваясь изнутри, — и вот зажглись первые звезды. В их недрах начался синтез более тяжелых элементов, вплоть до железа. Через пару миллиардов лет Вселенная стала отдаленно напоминать то, что мы видим сегодня.

Массивные звезды первого поколения кончали свои жизни грандиозными взрывами, во время которых возникли элементы тяжелее железа. Потом из этого вещества сформировались звездные системы второго поколения, в том числе и наша.

Процесс звездообразования продолжается и сейчас, хотя темп его постепенно замедляется, поскольку запасы межзвездного вещества расходуются быстрее, чем пополняются.

## **А ЧТО ПОТОМ?**

Что касается нашего Солнца, то про его будущее можно сказать достаточно определенно. Солнце принадлежит к классу желтых карли-

ков — спокойных долгоживущих звезд. Уже около 5 млрд лет оно светит, практически не меняясь. Но это может закончиться уже через 0,5–1 млрд лет, когда водород в ядре звезды выгорит и зона термоядерного синтеза переместится в слои вокруг ядра. Это приведет к «раздуванию» Солнца — оно превратится в красного гиганта. Через 4 млрд лет Солнце раздуется так, что поглотит Меркурий, Венеру и почти достигнет орбиты Земли. На Земле вся вода испарится, а большая часть атмосферы рассеется в космическое пространство. Ничего живого, понятное дело, не останется. А в ядре Солнца гелий начнет превращаться в углерод. Когда же и гелий «выгорит», Солнце может взорваться, сбросив свою распухшую оболочку. Оставшееся после взрыва компактное ядро (белый карлик) будет постепенно остывать, превращаясь в холодное безжизненное тело.

А что касается возможного развития Вселенной в будущем, то имеются самые разные сценарии. Теоретики, например, рассматривают гипотезу «Большого разрыва», связанного с изменением состояния вакуума, в момент которого наша Вселенная исчезнет за одно мгновение. Но это не очень скоро — через 22 млрд лет, и не наверняка.

Если же такого не произойдет, то через сотни миллиардов лет погаснут последние звезды и галактики погрузятся во тьму. Все планетные системы будут постепенно разрушены. Вероятно, галактики превратятся в гигантские черные дыры. В результате квантового процесса «испарения» черные дыры в конце концов тоже исчезнут и Вселенная будет представлять собой расширяющийся нейтрино-фотонный газ. В общем, совершенно безрадостная картина.

Но история космологии уже неоднократно демонстрировала нам, что картины, нарисованные совсем недавно, неожиданно оказываются устаревшими.

Реальность бесконечно разнообразнее и интереснее наших сегодняшних представлений о ней. Работы для физиков и космологов — непочатый край!

# ОГЛАВЛЕНИЕ

## ФИЗИКА В БЫТУ

*Предисловие автора*.....7

**ЧАСТЬ 1. МИР ЗВУКОВ**.....9

Глава 1. Физика звуков ..... 10

Глава 2. Восприятие звуков .....33

Глава 3. Воздействие звуков ..... 43

**ЧАСТЬ 2. ЧТО НАМ СВЕТИТ**.....53

Глава 1. Свет и цвет: физика и физиология.....54

Глава 2. Что надо знать об источниках света.....68

Глава 3. Лампы накаливания .....75

Глава 4. Люминесцентные лампы.....81

Глава 5. Светодиодные лампы.....89

**ЧАСТЬ 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ЧЕЛОВЕК**.....99

Глава 1. Законы электромагнетизма ..... 100

Глава 2. Естественные электромагнитные поля .....108

Глава 3. Человек в электромагнитных полях ..... 114

Глава 4. Электромагнитные излучения.....125

**ЧАСТЬ 4. НАДО ЛИ БОЯТЬСЯ РАДИАЦИИ?**.....141

Глава 1. Виды радиации ..... 142

Глава 2. Дозы и риски .....152

Глава 3. Естественный радиационный фон.....162

Глава 4. Техногенные источники радиации .....170

## ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ: ОТ АТОМА ДО КОСМОСА

*От автора* .....187

**ЧАСТЬ 1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ФИЗИКИ**.....189

Глава 1. Древняя Греция: торжество разума .....190

Глава 2. Научная революция XVII века: рождение физики .....192

Глава 3. Мегамир, макромир, микромир.....194

ЧАСТЬ 2. ФИЗИКА МАКРОМИРА .....	195
Глава 1. Классическая механика .....	196
Глава 2. Релятивистская механика .....	211
Глава 3. Тепловые явления.....	223
Глава 4. Электродинамика .....	239
Глава 5. Оптика .....	255
ЧАСТЬ 3. ФИЗИКА МИКРОМИРА .....	277
Глава 1. Законы микромира .....	278
Глава 2. Мир атомов и ядер.....	293
Глава 3. Фундаментальные частицы и фундаментальные взаимодействия.....	310
Глава 4. За пределы Стандартной модели .....	324
ЧАСТЬ 4. МЕГАМИР .....	331
Глава 1. Наша Вселенная .....	332
Глава 2. Темные неизвестные .....	338
Глава 3. Краткая история Вселенной .....	342

*Научно-популярное издание*  
История и наука Рунета. Подарочное издание

12+

**Алла Борисовна Казанцева**  
**ФИЗИКА.**  
**ИСКУССТВО ПОНИМАНИЯ МИРА**

Зав. редакцией *Елена Толкачева*  
Ответственный редактор *Виолетта Каламина*  
Литературный редактор *Анна Шапошникова*  
Корректоры *Вера Вересиянова, Инна Назарова*  
Технический редактор *Наталья Чернышева*  
Компьютерная верстка *Ольги Сухаревой*  
Дизайн обложки *Александра Воробьева*

Подписано в печать 21.05.2024. Формат 70×100/16. Усл. печ. л. 28,6.

Печать офсетная. Бумага офсетная.

Гарнитура NewBaskervilleITC. Бумага типографская.

Тираж экз. Заказ № .

Общероссийский классификатор продукции ОК-034-2014

(КПЕС 2008); 58.11.1 — книги, брошюры печатные

Произведено в Российской Федерации

Изготовлено в 2024 г.

Изготовитель: ООО «Издательство АСТ»  
129085, Российская Федерация, г. Москва,

Звездный бульвар, д. 21, стр. 1,

комн. 705, пом. I, этаж 7

Наш электронный адрес: WWW.AST.RU

Интернет-магазин: www.book24.ru

Өндіруші: ЖШҚ «АСТ баспасы»  
129085, Мәскеу қ., Звёздный бульвары, 21-үй, 1-құрылыс, 705-бөлме, I жай, 7-кабат  
Біздің электрондық мекенжайымыз: [www.ast.ru](http://www.ast.ru)  
Интернет-магазин: [www.book24.kz](http://www.book24.kz) • Интернет-дүкен: [www.book24.kz](http://www.book24.kz)  
Импортер в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».  
Қазақстан Республикасындағы импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.  
Дистрибьютор и представитель по приему претензий на продукцию в республике Казахстан:  
ТОО «РДЦ-Алматы»  
Қазақстан Республикасында дистрибьютор  
және өнім бойынша арыз-талаптарды қабылдаушының  
өкілі «РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., 3«а», литер Б, офис 1.  
Тел.: 8 (727) 251 59 89, 90, 91, 92. Факс: 8 (727) 251 58 12, вн. 107;  
E-mail: [RDC-Almaty@eksmo.kz](mailto:RDC-Almaty@eksmo.kz)  
Тауар белгісі: «АСТ» Өндірілген жылы: 2024  
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.  
Өндірген мемлекет: Ресей

ИЗДАТЕЛЬСТВО АСТ ПРЕДСТАВЛЯЕТ



Настоящая книга психолога Анастасии Шавыриной объединила две известные работы автора: «Психологические эксперименты. Реальные истории» и «Опасные психокульти и секты. Вся правда о манипуляциях сознанием».

Вас ждет увлекательное путешествие в мир невероятных психологических экспериментов, а также самых жутких психокульти и сект.

Большинство из описанных опытов шокируют, но при этом ставят очень важные вопросы: кто мы на самом деле и как устроена человеческая психика?

Книга рассказывает о работе сект, позволяет взглянуть на психокульти изнутри, знакомит с травмирующими людей психологическими практиками.

Вы поймете, каковы особенности мышления жертв, создателей сект и людей, призывающих вступить в них. Найдете упражнения и техники, которые помогут противостоять чужому влиянию.

Что такое Зефирный эксперимент? Почему животные массово погибают в идеальных условиях жизни? Зачем растить ребенка вместе с обезьяной? Отчего люди до сих пор попадают в сети мошенников? Как действуют психокульти? Что привело к массовой гибели людей в Джонстауне? Ответы на эти и многие другие вопросы вы прочтаете на страницах этого издания.

ИЗДАТЕЛЬСТВО АСТ ПРЕДСТАВЛЯЕТ

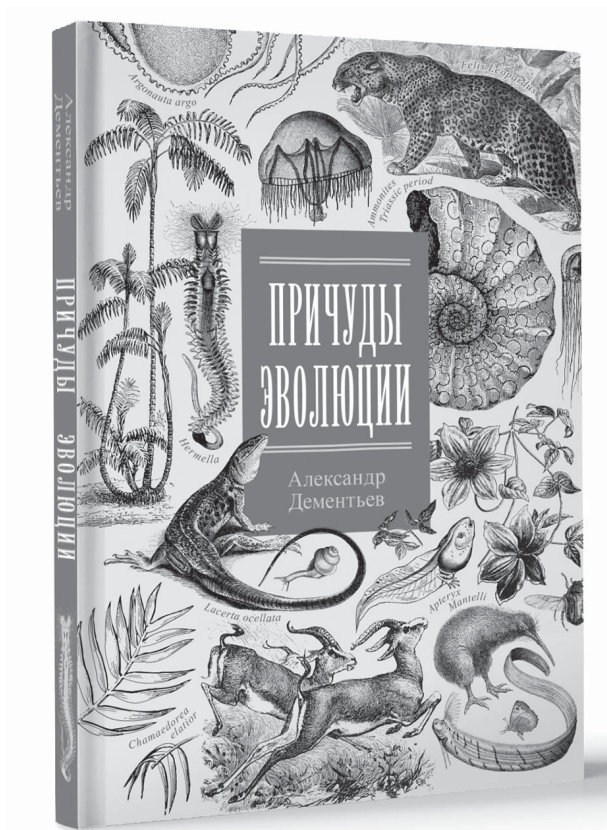


Отказывающиеся двигатели, запутанные координаты, сбивающиеся расчеты орбит — эти странные и порой спорные неурядицы стали частью истории освоения космоса. Авторы данной книги раскроют перед вами тайны, скрытые за призмой успехов. Вы погрузитесь в мир космических программ, которые были идеально спланированы, но оказывались под угрозой из-за самых невероятных недочетов.

Однако «Ошибки мировой космонавтики» — это не только развлекательное чтение для любителей космоса и интересных фактов. Это история о том, как человечество преодолевает преграды и стремится к новым горизонтам, несмотря на неуклюжесть некоторых шагов. За каждой ошибкой следуют глубокий анализ и опыт, которые помогают человечеству стать лучше в освоении космического пространства. Вы узнаете, какие уроки наука извлекла из множества непредвиденных ситуаций и как они повлияли на будущие миссии.

Подготовьтесь к путешествию: оно заставит вас улыбнуться, задуматься и поверить в то, что даже в самых нелепых случаях есть место для великого открытия.

## ИЗДАТЕЛЬСТВО АСТ ПРЕДСТАВЛЯЕТ



Мы привыкли идеализировать эволюцию, полагая, что все созданное ею обязательно имеет смысл. И действительно, ведь не зря у миног сохранился третий глаз, а крокодилы смогли на миллионы лет пережить своих сородичей — динозавров. Но каково калифорнийскому кондору есть тухлое мясо вместо свежего и насколько удобно жить двухголовой змее? Автор этой книги готов ответить на любые вопросы об эволюционном разнообразии и открыть тайны жизни самых причудливых созданий современности. И пусть выживает сильнейший!

Из книги «Причуды эволюции» вы узнаете:

- О 10 видах людей, которые жили до нас.
- О затерянных мирах на Земле: как сейчас выглядят животные, которые были замурованы в них на миллионы лет.
- Почему крокодилы выжили, а динозавры нет.
- Кто в животном мире способен обходиться без желудка и потеть молоком.
- Как кошки приручили человека и захватили мир.
- И как слоны могут спасти человечество от рака.

У многих физика ассоциируется с малопонятным школьным предметом, который не имеет отношения к жизни. Однако на самом деле это одна из тех наук, которые позволили сделать мир вокруг нас таким, какой он есть: машины, ракеты, космические станции, интернет, мобильная связь и прочие блага технической цивилизации. Физика позволила нам получить ответы на самые разнообразные вопросы:

- Что такое «шумовое загрязнение»?
- Почему одни звуки разрушают наш организм, а другие — лечат?
- Кто постареет быстрее: человек на Земле или космонавт?
- Откуда берется вездесущая радиация и как она на нас воздействует?
- Что представляет опасность для космонавтов при межпланетных путешествиях?
- Как можно увидеть звук?
- Почему малые дозы радиации полезны, а большие губительны?
- Как связаны мобильный телефон и плохая память?
- Почему правильно подобранное освещение — залог хорошей работы и спокойного сна?

Это и многое другое вы найдете на страницах настоящей книги.



Казанцева Алла Борисовна — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и экспериментальной физики МПГУ, финалист конкурса РАН 2019 и 2021 за лучшие работы по популяризации науки. Настоящее издание объединило два ее известных труда: «Физика в быту» и «Физика для всех: от атома до космоса».

книги для любого настроения здесь



ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА АСТ

[www.ast.ru](http://www.ast.ru) | [www.book24.ru](http://www.book24.ru)

 [vk.com/izdatelstvoast](https://vk.com/izdatelstvoast)  
 [ok.ru/izdatelstvoast](https://ok.ru/izdatelstvoast)

ISBN 978-5-17-164737-7



9 785171 647377