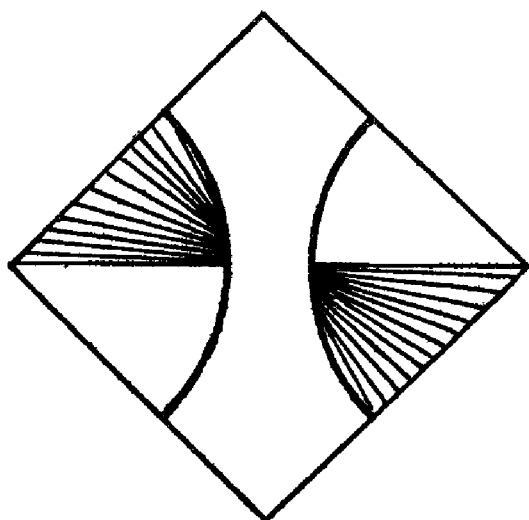


А.В.ШИЛЕЙКО
Т.И.ШИЛЕЙКО

В ОКЕАНЕ ЭНЕРГИИ



Издательство „Знание“
Москва
1989

Авторы: ШИЛЕЙКО Алексей Вольдемарович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроника» Московского института инженеров транспорта. Автор более 100 научных работ;

ШИЛЕЙКО Тамара Ивановна — инженер, член Союза журналистов СССР. Совместно с Шилейко А. В. написаны книги: «Кибернетика без математики», «Потомки каменного топора», «Электроны... электроны...», «Информация или интуиция?» и др.

Рецензенты: Г. Е. Пухов — академик АН УССР;
Ю. М. Шамаяев — доктор технических наук, профессор.

Шилейко А. В., Шилейко Т. И.
Ш81 В океане энергии.— М: Знание. 1989.— 192 с.—
(Наука и прогресс).— ISBN 5-07-000071-3: 50 к.—
100 000 экз.

Многие ли знают, что можно получить кусок льда, налив воду в кастрюлю, правда специальную, и поставив ее на огонь? А что общего между лазером и взводом солдат, марширующих по мосту? В чем главная ошибка инженера Гарина? Круг вопросов, на которые отвечают авторы книги, гораздо шире перечисленных, так как она посвящена сущности энергии, ее преобразованиям, мрачным (тепловая смерть Вселенной) и оптимистическим прогнозам.

Предназначена широкой читательской аудитории, особенно интересующейся проблемами современной физики.

2302030000—101 31—89
Ш 073(02)—88

ББК 32.85

ISBN 5-07-000071-3

© Издательство «Знание», 1989 г.

Предисловие

Современная физика рвется вперед гигантскими шагами, и темпы ее развития непрерывно ускоряются. У того, кто читает популярные книги, посвященные достижениям и проблемам современной физики, захватывает дух в гораздо большей степени, чем от приключенческого романа. В тылах у физики осталось еще очень много хотя и очевидного, но не до конца понятого.

С детства мы напичканы так называемыми азбучными истинами, но как раз к ним-то надо относиться с большой осторожностью. Волга впадает в Каспийское море — и это совершенно правильно. Солнце встает на востоке и садится на западе — а вот тут уже как посмотреть. Например, на Северном полюсе вообще нет направления на запад и восток. Энергия не возникает из ничего и не исчезает бесследно — еще одна азбучная истина, и снова истина совершенно справедливая. Но откуда тогда разговоры об энергетическом кризисе?

Наша Земля непрерывно получает энергию от Солнца и отдает ее в мировое пространство. Отдает ровно столько, сколько получает. Это чрезвычайно важно. Если бы количество энергии, получаемое Землей и окружающей Землю атмосферой, хоть чуть-чуть, но превышало бы количество отдаваемой энергии, это повлекло бы за собой последствия катастрофические. Общий запас энергии у Земли и атмосферы остается постоянным. Мы поистине обитаем в океане энергии. Почему тогда мы говорим о нехватке энергии?

Все дело не в самой энергии, а в том, как она распределена в пространстве, какие формы принимает. Существуют разные формы энергии, а сама энергия все время переходит из одной формы в другую. Вот очередная азбучная истина. Но если взглядеться попристальнее, оказывается, что форма одна — это энергия движущихся частиц, или, иначе говоря, механическая кинетическая

энергия. Различие форм определяется тем, что именно движется и как движется. Самый совершенный вид энергии — энергия лазерного луча, а самая несовершенная форма энергии — тепловая. Все остальные формы энергии распределены между этими двумя крайностями, и преобразование одной формы в другую, по существу, означает увеличение или уменьшение степени упорядоченности.

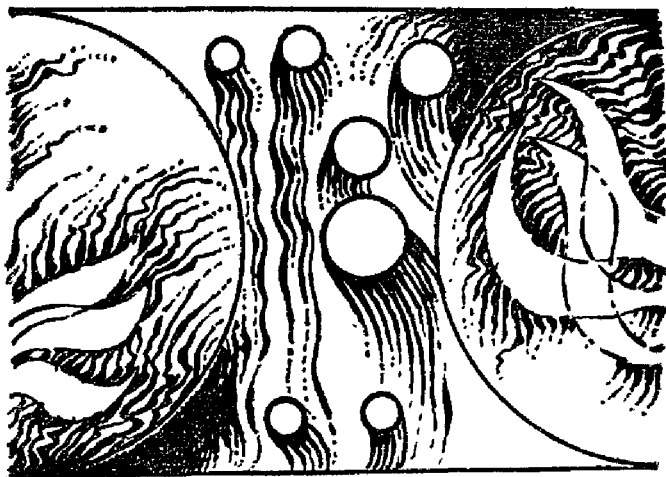
Наконец, последняя азбучная истина. Мир вещей, окружающих нас и доступных нашим органам чувств, достаточно хорошо описывается классической, или ньютоновской, физикой. Лишь когда мы обращаемся к вещам очень малых размеров, заглядываем в микромир, начинают действовать законы квантовой физики, а когда мы обращаемся к миру скоростей, приближающихся к скорости света, начинают действовать законы теории относительности. Наверное, по этой причине мы до сих пор продолжаем изучать в школе в основном классическую физику, получая самое общее представление о теории относительности и квантовых эффектах.

Все магнитные явления — чисто релятивистские, независимо от того, какие скорости действуют в системе, где такие явления возникают. Авторы показывают также, что чисто квантовомеханическое соотношение неопределенностей Гейзенберга лежит в основе газовых законов. Собственно, на этом можно было бы и закончить, нет смысла в предисловии пересказывать содержание книги. Не хочется, однако, чтобы у читающего предисловие создалось впечатление, что книга посвящена чему-то на сегодня малоактуальному. Отнюдь нет! Авторы поставили себе задачу разобраться в отдельных вопросах, казалось бы, оставшихся далеко за линией фронта передовой науки. Но достаточно сказать, что, упорядочивая движение с целью повышения качества энергии, мы получаем не только мощный лазерный луч, но и системы, способные рассуждать, относящиеся к области искусственного интеллекта. Так что проблемы, которые авторы ставят в своей книге, вполне актуальны, и книгу можно уверенно рекомендовать массовому читателю.

Академик АН УССР Г. Е. Пухов

ГЛАВА 1

Теплота



Ми́ли и километры

У Хемингуэя есть рассказ о девятилетнем мальчике, приехавшем к отцу на каникулы. Мальчик заболел. Из разговора отца с врачом он узнал, что температура у него сто два градуса. Но во Франции ребята в школе говорили: когда температура сорок четыре градуса, человек умирает. Мальчик ждал смерти весь день. Вечером отец узнал, о чем думает сын, и успокоил его:

«— Бедный мой малыш! Это все равно как мили и километры. Ты не умрешь. Это просто другой термометр. На том термометре нормальная температура тридцать семь градусов, на этом — девяносто восемь.

— Ты это наверное знаешь?

— Ну, конечно,— сказал я,— это все равно как мили и километры. Помнишь? Если машина прошла семьдесят миль, сколько это километров?»

Интересно, что Хемингуэй допускает здесь неточность. Температурная шкала Фаренгейта задумана так, чтобы температуре человеческого тела 36,6 градуса Цельсия соответствовало 100 градусов по Фаренгейту.

Когда человек заболевает, его организм мобилизует свою энергию на борьбу с возбудителем болезни. Больше энергии — выше температура. Отсюда, кажется, можно было бы заключить, что температура — суть мера

количества энергии. Но кому нужна такая путаница — мили и километры, градусы Цельсия и градусы Фаренгейта, а еще ведь бывают градусы Кельвина и градусы Реомюра? Что-то нечеткое есть в самом понятии температуры, и с этим мы еще не раз столкнемся в дальнейшем.

Эту книгу мы посвящаем энергии — различным ее видам и проявлениям. Начнем с тепловой энергии, короче, с теплоты. И приложим все усилия, чтобы не возникало путаницы, как с милями и километрами.

Что такое тепловая энергия? Все окружающие нас тела, твердые, жидкие и газообразные, состоят из отдельных частиц — молекул. Сегодня это звучит почти как «дважды два — четыре» или «Волга впадает в Каспийское море». Но еще в начале нашего века все было далеко не так. В рассказе А. Н. Толстого «Большие неприятности» студент на пароходе, ухаживая за хорошенькой барышней, горячо толковал ей про молекулярную теорию.

— Вы только поймите, до чего все ясно становится, — уверял он.

Действительно, если понять, все становится предельно ясно. Но вот с этим самым «понять», к сожалению, дело обстоит не совсем просто. Не только пароходные барышни, но и некоторые сегодняшние специалисты не могут похвалиться, что понимают все до конца.

Итак, все тела состоят из молекул. Молекулы находятся в непрерывном движении и, следовательно, каждая молекула обладает определенным запасом кинетической энергии, численно равным половине произведения массы молекулы на квадрат ее скорости. Сумма кинетических энергий всех молекул каждого тела — это и есть запас его тепловой энергии, или, как иначе говорят, количество тепла, накопленное телом. Вот и ответ на наш вопрос. Тепловая энергия — обычная механическая кинетическая энергия движущихся молекул. К сожалению, эта простая мысль далеко не всегда приходит в голову.

Молекулы любого тела непрерывно взаимодействуют друг с другом, обмениваются своими энергиями. Но сумма их кинетических энергий остается постоянной, если только данное тело не обменивается энергией с другими телами. Сказанное не просто слова — это одна из фор-

мулировок закона сохранения, которому подчиняется энергия.

Несомненно, несколько крупных открытий в физике удалось сделать потому, что многие теории и выводы подвергались сомнению. Все, что угодно, кроме закона сохранения энергии. Хотите конкретный пример? Пожалуйста. В 30-е годы нашего века исследователи процесса распада радиоактивных ядер обнаружили, что баланс энергий вроде бы не сходится. Что это? Нарушение закона сохранения энергии? Легко представить себе, к каким «результатам» пришли бы ученые, допустив возможность нарушения этого закона. Но, к счастью, все случилось не так.

— Закон сохранения энергии не может быть нарушен,— сказал немецкий физик Вольфганг Паули.— Не сходится баланс энергий — значит, мы учли не все. А что, если в процессе участвует еще какая-то неизвестная частица, уносящая часть энергии?

Так оно и оказалось. Предсказанная Паули частица — нейтрино — вскоре была открыта.

Закон сохранения энергии в этом смысле не исключение. Столь же незыблемы законы сохранения количества движения и момента количества движения. Лучший способ понять какое-либо явление — это постараться описать его через количества энергии тел или частиц, принимающих участие в процессе, и потом рассуждать, исходя из незыблемости закона сохранения количества энергии. Такому методу будем следовать и мы.

Является ли Земля с окружающей ее атмосферой изолированной системой? Нет, конечно. Земля получает огромное количество энергии от Солнца, отдает энергию в пространство. Но баланс энергии в системе Земля — космос остается примерно постоянным. Это несомненно так, иначе температура Земли и атмосферы неуклонно повышалась бы или уменьшалась или изменялся бы ее химический состав. Откуда же тогда разговоры об энергетическом кризисе?

Ответ на этот вопрос и составляет основное содержание первой главы.

Явления, вызываемые тепловой энергией, а также явления, связанные с преобразованиями тепловой энергии в другие ее виды, изучаются наукой термодинамикой. Термодинамика зародилась в глубокой древности. Философы древности и ученые эпохи Возрождения полагали, что теплота есть какое-то движение. Какое именно, они не могли еще указать. Той же точки зрения придерживался и Ломоносов. Его работа «Рассуждения о природе тепла и холода» вышла в свет в 1750 году.

В середине XVIII века, однако, взгляды на природу теплоты резко меняются. Выдвигается теория теплорода, или флогистона, — невесомой, неощутимой жидкости, или флюида, который может переливаться из одного тела в другое. Подобное представление о теплоте просуществовало недолго. Уже в конце XVIII века, исследуя нагрев металла при его сверлении, Румфорд высказал сомнение в том, что здесь играет какую-то роль теплород. Сокрушительный удар по теории теплорода нанес Джоуль своими опытами по преобразованию механической энергии в тепловую, которые он проводил в 1847—1878 годах.

Так в рамках термодинамики в XIX веке сформировалось одно из основополагающих утверждений современной науки — закон сохранения энергии, его называют первым началом термодинамики.

Идеальный газ — это скопление идеальных молекул — гладких шариков, не имеющих структуры, не притягивающихся друг к другу, не отталкивающихся друг от друга и идеально упругих как при столкновениях друг с другом, так и при столкновениях со стенками сосуда, в котором газ заключен. Идеальные молекулы, как и реальные молекулы реального газа, находятся в непрерывном движении, и каждая обладает запасом кинетической энергии. Сталкиваясь, они обмениваются энергиями, но сумма кинетических энергий всех молекул может измениться только тогда, когда данный объект отдает или получает энергию извне. Если такого обмена не происходит, т. е. объем с газом изолирован, сумма кинетических энергий всех его молекул остается неизменной в полном соответствии с первым началом термодинамики. Эксперименты показывают, что при обычных температуре и давлении поведение реального газа достаточно

точно совпадает с тем, как вел бы себя идеальный газ в аналогичных условиях.

Коли так, сделаем и мы объем с идеальным газом главным героем по крайней мере первой главы этой книги. Как объект изучения идеальный газ очень удобен. А то, что выводы, к которым приходят, размышляя об идеальном газе, в большинстве случаев оказываются близкими к реальности, давно известно.

В 1834 году француз Б. Клапейрон, который долгое время был профессором Петербургского института путей сообщения, вывел свое знаменитое уравнение. Согласно уравнению Клапейрона давление идеального газа, помноженное на занимаемый им объем и поделенное на его абсолютную температуру, есть величина постоянная, зависящая только от количества газа. Уравнение Клапейрона верой и правдой служит до настоящего времени, без него не обходится ни расчет двигателя внутреннего сгорания, ни расчеты домашнего холодильника или компрессора. С него же обычно начинают изучение термодинамики.

Но согласитесь, правильно посчитать, пользуясь готовой формулой, гораздо легче, чем понять. Из уравнения Клапейрона следует, что изменение одной из трех входящих в него переменных величин в общем случае влечет за собой изменение двух остальных. Например, уменьшается объем идеального газа — повышается его давление и увеличивается температура. Так должно быть согласно теории, то же самое наблюдается и в эксперименте. Температура идеального газа пропорциональна средней энергии, приходящейся на одну его молекулу. Увеличивается температура — значит, увеличивается энергия. Но представьте себе, что вы сжимаете в руке теннисный мячик, и скажите, почему при уменьшении объема его температура должна увеличиваться?

Классическое объяснение этого факта таково. Уменьшая объем, вы совершаете механическую работу против силы давления идеального газа. Эта работа преобразуется в энергию молекул. Правильно? Конечно, не только качественно, но и количественно. И все-таки непонятно, как уменьшение объема может сказаться на кинетической энергии, т. е. в конечном итоге на скорости движения молекул, а следовательно, на температуре?

Предлагают и такое объяснение. Мол, при сжатии сосуда с газом его стенки движутся, и это движение пе-

редается сталкивающимися со стенками молекулам. В подобном случае изменение кинетической энергии молекул вроде бы должно зависеть от скорости, с которой вы сжимаете сосуд. А вот этого-то и не наблюдается. Как же на самом деле механическая работа, совершаемая при сжатии сосуда, приводит к увеличению кинетической энергии молекул идеального газа?

Встреча с квантами

Уравнение Клапейрона знают все — его проходят в школе. Большинство, конечно, благополучно забывают сразу после сдачи экзамена. Кое-кто (мы не имеем в виду специалистов-физиков) помнит и относится к нему как должно. Но лишь немногие, к числу последних относятся и авторы книги, пытаются разобраться вот в чем. Уравнение Клапейрона обобщает огромное количество экспериментальных данных — в свое время было потрачено достаточно сил, чтобы выверить все досконально. И все же остается сомнение, которое не дает нам покоя: почему постоянная, входящая в уравнение Клапейрона, — ее называют универсальной газовой постоянной — равна $0,082 \text{ л} \cdot \text{ат/град} \cdot \text{моль}$? Почему она такая, а не какая-нибудь еще? Почему именно восемьдесят две тысячные?

В свое время Пифагор считал, что существуют особые магические числа, которые правят миром. Но даже ему не приходило в голову, что магическим числом могут быть восемьдесят две тысячные. А ведь если полистать школьный учебник физики, то и дело будешь наткаться на всякого рода постоянные, и все они выражаются числами с большим количеством цифр и совершенно непонятно, почему они такие, а не какие-либо еще.

Сегодня все знают — мир описывается квантовой физикой и теорией относительности. Но к сожалению, глубоко укоренилось мнение, что существует особый микромир — мир атомов, электронов и других мельчайших частиц, законы квантовой физики якобы справедливы только в этом микромире. А в мире окружающих нас «больших» вещей можно вполне обойтись классической физикой.

Слов нет, уравнения Клапейрона справедливы, и если вы станете, например, надувать футбольный мяч, то мо-

жете совершенно точно вычислить, как будет увеличиваться давление воздуха в нем, как будет повышаться температура этого воздуха, а измерив эти величины, обнаружите полное совпадение с теорией. Но по-прежнему останется непонятным, почему все происходит именно так, а не иначе?

**Можно все, кроме того,
что нельзя**

Принято считать, что квантовая физика очень сложна. — Сдал кванты! — раздается ликующий возглас в коридоре университета, и это обстоятельство признается чуть ли не равносильным окончанию физического факультета. На самом деле квантовая физика в некоторых отношениях проще классической. Самая ее сущность может быть сформулирована одной фразой: можно все, кроме того, что нельзя. В основе квантовой физики лежат несколько фундаментальных законов, носящих характер запретов. Прежде всего это законы сохранения энергии, количества движения и момента количества движения. Формулируются они именно как запреты. Энергия, количество движения и момент количества движения не могут возникать из ничего или исчезать бесследно. Любое явление, не противоречащее основным запретам, может произойти и происходит на самом деле. Квантовая физика в основном занимается подсчетом того, насколько часто происходит то или иное из числа разрешенных событий.

Следующий запрет квантовой физики называется соотношением неопределенностей Гейзенберга. Он гласит: произведение неопределенности координаты материального объекта на неопределенность количества движения этого объекта не может быть меньше некоторой постоянной величины, называемой постоянной Планка. Постоянная Планка равна $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·с. Еще одна постоянная, столь же неудобочитаемая, как и предыдущие? Подождем, однако, делать выводы.

Для соотношения неопределенностей есть и такое выражение: произведение неопределенности в величине энергии материального объекта на неопределенность времени не может быть меньше постоянной Планка.

Оба рассмотренных выражения соотношения неопределенностей суть неравенства. Заменим их равенствами.

Не станем пока обсуждать правомочность такой замены. Поделим первое равенство на второе. Еще несколько преобразований, и получаем интересный результат. Неопределенность объема, в котором находится материальный объект, помноженная на величину давления, которое объект оказывает на стенки сосуда, взаимодействуя с ними, и поделенная на неопределенность энергии этого объекта, равна единице. Не каким-то там восьмидесяти двум тысячным, а в точности единице. Такая закономерность внушает к себе доверие именно своей простотой.

Что означает в наших рассуждениях слово «неопределенность»? К сожалению, на сегодняшний день здесь еще не достигнута полная четкость. В связи с соотношением неопределенностей часто говорят, что, мол, мы не можем определить координату объекта с погрешностью меньшей, чем неопределенность, устанавливаемая соотношением. Это «мы» сразу зачеркивает всю ценность закона. Что это за физика, которая зависит от нас, то есть от наблюдателей?

К счастью, на самом деле все обстоит не так. Любой материальный объект, не обязательно такой маленький, как молекула, оказывается, не имеет точной координаты. Что же касается нашего соотношения, то, с одной стороны, неопределенность объема означает лишь то, что положение объекта внутри объема неопределимо. С другой стороны, столь же уверенно можно сказать, что вне объема данный объект не находится. С этой точки зрения неопределенность объема — это и есть сам объем, занимаемый объектом.

Соотношение неопределенностей при неумелом его использовании часто приводит к парадоксам. Например, неподвижный объект (неопределенность количества движения равна нулю) имеет бесконечную неопределенность координаты. Абсолютно неподвижный стул занимает всю вселенную. Мы не наблюдаем подобных явлений потому, что в природе нет абсолютно неподвижных объектов — стул движется вместе с Землей.

Те же рассуждения справедливы и для энергии. Неопределенность величины энергии не может быть больше самой величины энергии. Перефразируем это утверждение следующим образом. Объем, занимаемый материальным объектом, помноженный на давление, оказываемое этим объектом на стенки сосуда, в который он

заключен, и поделенный на величину энергии объекта, равен единице.

Представьте себе, что ваш объект — идеальная молекула. Для нее справедливо все сказанное. Теперь представьте, что в том же объеме, о котором идет речь, содержится не одна, а много молекул. Ясно, что давление, оказываемое одной молекулой, будучи помноженным на общее число молекул, даст их полное давление, а энергия одной молекулы, будучи помноженной на общее число молекул, даст их полную энергию. Помножив и разделив полученное нами соотношение на общее число молекул, вы убедитесь в том, что объем, занимаемый идеальным газом, помноженный на давление этого газа и поделенный на его внутреннюю энергию, есть единица. На деле все сложнее. Кинетическая энергия молекул не ограничивается той энергией, которая проявляется при взаимодействии со стенками сосуда. Молекулы обладают, к примеру, кинетической энергией вращения вокруг собственной оси. В зависимости от различных обстоятельств в нашем соотношении могут появиться учитывающие их коэффициенты. Но это простые коэффициенты, например три вторых или пять вторых. Смысл их становится ясным, если рассмотреть каждое движение по отдельности. А в целом наше соотношение между объемом идеального газа, его давлением и энергией представляет собой просто иную форму записи соотношения неопределенностей Гейзенберга.

Приблизились ли мы к пониманию сущности газовых законов? Конечно, приблизились. Потому что теперь мы выводим их из гораздо более общих законов, справедливых не только для идеального газа, а для всех без исключения материальных объектов. Но как перекинуть мостик между выведенным нами соотношением и законом Клапейрона? Сделать это удастся не сразу, а пока отвлечемся немного в сторону.

Кто выиграл?

Подсчитывая полную энергию идеального газа, мы помножили энергию одной молекулы на количество молекул. А ведь так можно поступать, лишь когда все молекулы имеют одинаковую энергию, но такого в природе не бывает. Не ходят все без исключения по одной и той же тропинке, шаг в шаг. Пример с дорогой мы привлек-

ли лишь для того, чтобы попытаться сделать наглядней ту мысль, что одним и тем же путем ходит большинство людей и потому протаптываются тропинки. Разберемся во всем этом подробнее.

Многие, конечно, видели, как по телевидению разыгрывается тираж спортлото. В прозрачный барабан насыпают шарики. Такие же, как шарики для игры в пинг-понг, но побольше и с нарисованными на них цифрами. Барабан начинает вращаться — шарики приходят в движение. Они сталкиваются между собой, отскакивают от дна и от стенок сосуда. Все это прекрасно видно, так как стенки сосуда прозрачные. Если бы существовал некто, способный различать молекулы, он наверняка сказал бы, что картина ему знакомая. Шарики ведут себя так же, как молекулы окружающего нас мира.

А теперь займемся подсчетами. Итак, лотерейная машина отключена и барабан только что перестал вращаться, но шарики продолжают двигаться по инерции. Каждый шарик движется и, следовательно, обладает некоторым запасом кинетической энергии. Сталкиваясь, шарики обмениваются энергией. Но если пренебречь трением, сумма кинетических энергий всех шариков, после остановки барабана должна оставаться постоянной.

Предположим для простоты, что в барабане находятся 10 шариков и их суммарная кинетическая энергия также равна 10 — единицу измерения выберете сами. Такое может быть, например, в случае, если из десяти шариков один движется и обладает кинетической энергией 10, а остальные неподвижны и энергии их равны нулю. Назовем подобный случай состоянием. Описанное состояние может быть реализовано десятью различными способами: первый шарик движется — остальные неподвижны, второй шарик движется — остальные неподвижны и т. д.

А если в движении находятся два шарика, каким количеством способов может быть реализовано заданное состояние? Сначала выбираем два шарика из десяти. Простой подсчет показывает, что это можно осуществить 45 способами. Дальше опять-таки все 10 единиц кинетической энергии могут принадлежать одному шарiku, или 9 единиц одному и 1 — другому, или 8 единиц одному и 2 — другому и так далее, всего 10 вариантов. Следовательно, существует — 45 помножить на 10 — всего 450 способов реализовать второе состояние.

Не станем утомлять читателя дальнейшими расчета-

ми, хотя при желании проделать их достаточно легко. Число способов, с помощью которых реализуется данное состояние, стремительно растет по мере увеличения числа шариков. Скажем лишь, что состояние, в котором энергия как-то распределена между всеми десятью шариками, реализуется 3 628 800 различными способами. Это число способов, которыми можно распределить 10 значений энергии между десятью шариками.

Конечно, это еще не все. Мы предполагали, что энергия распределяется между шариками целыми порциями: 1, 2, 3 и т. д. А ведь есть варианты, когда один шарик обладает энергией, например 1,5 или 1,75 единицы, а второй — соответственно 8,5 и 8,25 единицы.

Все эти расчеты не были бы нужны, если бы можно было видеть шарики и каким-то способом измерять их энергию. Но это невозможно, когда имеешь дело с молекулами, а тем более с атомами. И вот тут-то приходится занять противоположную позицию. Приходится исходить из того, что мы не знаем и принципиально не можем знать ни того, какой энергией обладает каждая молекула в каждый момент времени, ни того, какую часть этой энергии она отдает или приобретает в результате очередного столкновения.

Еще одно начало

Но все же мы кое-что знаем. Энергия в результате взаимодействия распределяется между шариками и между молекулами равномерно. Если в лотерейной машине каждый раз приводить в движение только один шарик, то, сталкиваясь с соседями, очень скоро он передаст свою энергию всем остальным. Картина будет точно такой, какая наблюдается на самом деле, т. е. все шарики движутся хаотично, и невозможно предсказать заранее, на какой лотерейный билет выпадет выигрыш в тираже. Так что пример с лотереей мы выбрали не случайно. На научном языке говорят, что все состояния физической системы, включающей в себя большое число неразличимых объектов, равновероятны.

Продолжим наблюдение за лотерейной машиной. Попробуем посчитать, сколько времени длится то или иное состояние шариков. Для этого предполагаем, что все состояния равновероятны. Иными словами, с совершенно

одинаковыми шансами в данный момент времени можно наблюдать любое состояние.

Вспомните наши подсчеты в разделе «Кто выиграл?». Предположим, что одно состояние удерживается в системе очень недолго, скажем, одну миллионную долю секунды. Что отсюда следует? Правильно, в состоянии, когда лишь один шарик обладает энергией 10 единиц, а остальные неподвижны, система будет находиться в течение десяти миллионных долей секунды; в состоянии, когда в движении находятся два шарика, система будет находиться в течение срока пяти стотысячных долей секунды, а в состоянии, когда полная энергия каким-то образом распределена между всеми шариками, система будет находиться примерно три и шесть десятых секунды.

Три и шесть десятых — это настолько больше десяти миллионных и даже сорока пяти стотысячных, что у нас есть все основания утверждать: подавляюще большую часть времени физическая система проводит в состоянии, когда ее полная энергия тем или иным способом распределена между всеми шариками (молекулами).

Только что сказанное — одна из формулировок важнейшего закона природы, называемого вторым началом термодинамики. Его можно выразить иначе: если в некоторый момент наблюдается состояние, когда вся энергия системы принадлежит лишь одному шарiku, то уже через десять миллионных долей секунды это состояние сменится другим, с более равномерным ее распределением, или, еще короче, всякая физическая система стремится к состоянию с более равномерным распределением энергии.

Это утверждение равносильно предыдущему. Только надо уточнить, в каком смысле здесь используется слово «стремится». На самом деле система никуда не стремится. В любой момент может случиться так, что она будет находиться в состоянии, когда движется либо один шарик, либо два, либо три и т. д. Просто если подобное состояние действительно наблюдается, то уже в следующее мгновение система перейдет в состояние с более равномерным распределением. Произойдет это не потому, что система куда-то стремится, а потому, что состояние с более равномерным распределением реализуется большим числом способов.

Число способов, которым может быть реализовано данное состояние, называется статистическим весом это-

го состояния, а натуральный логарифм от статистического веса получил название энтропии.

Чаще всего второе начало термодинамики формулируется следующим образом: всякое изменение состояния системы может происходить лишь в сторону увеличения энтропии. Что здесь важно понять? Говоря о движении системы, имеют в виду ее движение как единого целого, и движение достаточно медленное. Если в некоторый момент система находится в состоянии с малым статистическим весом — движется лишь один шарик — и следовательно, с малой энтропией, то очень скоро система перейдет в состояние с большим статистическим весом — с большей энтропией. Большую часть времени система проводит в состоянии с максимальной энтропией. Скажем так: энтропия системы, предоставленной самой себе, может либо возрастать, либо оставаться постоянной, равной своему максимальному значению. В последней формулировке второе начало термодинамики называется также законом неубывания энтропии.

Слово «энтропия» произносилось особенно часто в связи с бытовавшей в свое время теорией так называемой тепловой смерти Вселенной. О ней речь впереди. А пока вспомним дела давно минувших дней.

Ахиллес и черепаха

Древнегреческий философ Зенон, живший в V веке до н. э., построил несколько парадоксальных рассуждений — апорий, которые озадачили его сверстников и продолжают озадачивать многих наших современников. Быстроногий Ахиллес, утверждал Зенон, никогда не догонит медлительную черепаху. Пусть Ахиллес способен двигаться в 2 раза быстрее черепахи. За то время, пока Ахиллес покрывает отделяющее его от черепахи расстояние, черепаха отползет на половину этого расстояния. Пробежит Ахиллес половину, а черепаха отползет еще на одну четверть, и так далее до бесконечности.

Какие рассуждения можно услышать сегодня по поводу этой апории Зенона? Наш повседневный опыт утверждает, говорят одни, что тот, кто движется быстрее, обязательно догонит того, кто движется медленнее. Поэтому нечего тратить время на пустяки.

Любители точных расчетов вооружаются цифрами. Черепаха проползает сначала половину, потом четверть,

потом одну восьмую и так далее расстояния, равного тому, которое первоначально отделяло ее от Ахиллеса. Примем это расстояние за единицу. Сумма дробей: одна вторая, плюс одна четвертая, плюс одна восьмая, плюс и т. д. (ее называют суммой ряда) стремится к пределу, равному единице. Следовательно, пока продолжаются все эти рассуждения, черепаха неуклонно приближается к точке, отстоящей на единицу от первоначального положения. За те же последовательные промежутки времени Ахиллес пробежит сначала единицу расстояния, затем еще половину, затем одну четвертую и т. д. Вся сумма стремится к пределу, равному двум. Точка, отстоящая на две единицы расстояния от точки старта Ахиллеса и на одну единицу расстояния от точки старта черепахи, и есть та точка, где соперники встретятся, если, конечно, они движутся в одну и ту же сторону.

На первый взгляд два приведенных мнения подтверждают одно другое. Но не тут-то было! Ничего подобного, говорят третьи, наш повседневный опыт не оставляет сомнений: никому и ни при каких условиях не удастся совершить бесконечное количество движений (рассматриваемые нами суммы состояли из бесконечного числа слагаемых). А пока количество движений остается конечным, хоть и сколь угодно большим, между Ахиллесом и черепахой останется некоторое, хоть и безгранично малое, расстояние. Так что до сих пор еще не разрешена до конца эта апория Зенона.

Попробуем разобраться сами. Построение Зенона основано на предположении о том, что расстояние можно бесконечно делить пополам. На научном языке это звучит как предположение об однородности и непрерывности пространства. Наш повседневный опыт, казалось бы, подтверждает это. Действительно расстояние в 1 метр всегда можно поделить на два отрезка по 0,5 метра. Человек с хорошим зрением может разделить пополам отрезок длиной примерно в $\frac{1}{10}$ миллиметра. Вооружившись электронным микроскопом, можно оперировать с расстояниями порядка одной миллионной доли сантиметра.

Ну а дальше? Если говорить о повседневном опыте, то он подсказывает нам следующее. Метр поделить можно, сантиметр — можно, миллиметр — можно, микрометр — можно. Значит, можно поделить любое другое сколь угодно малое расстояние. Так рассуждал Зенон

около 2500 лет тому назад. Так рассуждает и большинство из нас. Здесь-то и затаилась опасность серьезной ошибки.

Природа не всегда следует подобным схемам. Не надо далеко ходить за примерами — взять ту же скорость: один метр в секунду можно удвоить, километр в секунду — можно, тысячу километров в секунду — можно, сто тысяч километров в секунду — можно, двести тысяч... Стоп! В природе не бывает скоростей, больших, чем примерно триста тысяч километров в секунду, т. е. больших скорости света.

Как в этом смысле обстоит дело с расстояниями, мы не знаем. Теоретически можно оперировать с отрезками длиной порядка 10^{-23} сантиметра. Бывают ли более короткие расстояния? Неизвестно.

Вот и ответ на рассуждения Зенона. Они справедливы, впрочем, в той же степени, как и рассуждения современных математиков, лишь до тех пор, пока после очередного деления пополам расстояние не станет меньше 10^{-23} сантиметра. Дальше просто нельзя рассуждать о том, чего не знаешь. Современный ученый скажет, что задача Зенона некорректна.

Некорректна апория об Ахиллесе и черепахе и по другой причине. Согласно теории относительности, которая, кстати, тоже наделала много хлопот нашему повседневному опыту, расстояние зависит от скорости. Ахиллес видит перед собой одно, а судья, выносящий решение об исходе состязания с черепахой, — другое. В таких условиях вообще вопрос: догонит или не догонит? — ставить бессмысленно.

Делим пополам

Зачем в книге об энергии понадобился рассказ об Ахиллесе и тем более о черепахе — существе медлительном и косном?

Чтобы ответить на этот вопрос, вернемся к разделу «Кто выиграл?», где мы подсчитывали количество способов, которыми может быть реализовано какое-либо заданное состояние, или, как мы называли эту величину, статистический вес. Рассуждали мы так. Пусть в объеме имеется десять молекул, то бишь шариков, и каждая из них может иметь одну из десяти различных возможных величин энергии.

В том, что мы выбрали десять, а не какое-то другое число молекул, нет ничего неправомерного. Законы, которые мы сейчас изучаем, должны быть справедливыми для любого количества вещества, в том числе и для десяти молекул.

Но почему каждая из молекул может иметь одну только из десяти различных величин энергии? Если энергия всех молекул равна, скажем, 10 единицам, то ясно, что энергия любой молекулы в этом объеме не может превышать 10 единиц. Это непреложный факт, мы однажды договорились в основу любых рассуждений закладывать несомненность закона сохранения энергии.

Дальше давайте рассуждать так. Сколько различных величин энергии может иметь каждая молекула? Делим интервал в 10 единиц энергии пополам и считаем, что одна молекула может иметь энергию либо 10, либо 5 единиц. Согласны, что это слишком мало значений. Делим половинку еще раз пополам и получаем для возможных значений энергии молекулы величины 2,5; 5; 7,5 и 10. Опять мало? Снова делим пополам каждую четвертушку.

Вы уже поняли, какая опасность подстерегает нас на этом пути? Если продолжить деление пополам так же, как это делал Зенон со своей черепахой, то получится, что количество значений энергии, которые может принимать одна молекула, равно бесконечности. Но если так даже в простейшей системе, состоящей не из десяти, а из двух молекул, количество способов, которыми может быть реализовано некоторое заданное состояние, равно бесконечности. Бесконечности равен статистический вес. Бесконечности равна энтропия.

Но если независимо от величины энергии энтропия равна бесконечности — ведь любой интервал можно делить пополам до бесконечности, — то это значит, что такой величины просто не существует. А может быть, нам и не надо никакой энтропии? Может быть, это понятие выдуманно лишь для затемнения сути простых вещей?

Своими органами чувств человек воспринимает пространство и время как нечто непрерывное, допускающее неограниченное деление. То же самое относится и к другим физическим величинам, в том числе и к энергии. Потенциальная энергия гири, поднятой на какую-то высоту, равна произведению этой высоты на массу гири и на ускорение силы тяжести. Ничто из нашего повседнев-

ного опыта не говорит о том, что мы не можем поднять гирю на столько, потом еще на полстолько, потом еще на четверть столько и так далее до бесконечности.

Представлялся мир непрерывным и ученым вплоть до конца XIX века. Представление о непрерывности особенно укрепилось в науке после того, как великий Ньютон научил нас оперировать с бесконечно малыми и тем самым позволил ввести не только в рассуждения, но и в строгие математические выкладки понятие о бесконечной делимости. Но оказалось, что это не так.

Выход из затруднительного положения был найден после того, как Макс Планк высказал предположение о том, что любая физическая система не может принимать бесконечное число различных состояний. Для нее возможны только состояния, отличающиеся друг от друга не менее чем на величину элементарного кванта действия, получившего название постоянной Планка. Мы однажды уже упоминали эту постоянную.

Благодаря открытию Планка мы точно знаем, как подсчитывать статистический вес. Следует исходить из того правила, что два ближайших состояния одной и той же молекулы должны отличаться друг от друга на величину действия, равную постоянной Планка. Количество способов, которыми может быть реализовано данное состояние исследуемой системы, состоящей из сколь угодно большого количества составных частей, оказывается величиной, хоть и фантастически огромной, но поддающейся счету. А при переходе от статистического веса к энтропии, т. е. взяв от него логарифм, вы получите число, вполне пригодное к употреблению.

Таким образом, энтропия оказывается определенной конечной величиной, имеющей определенный и достаточно ясный смысл: Это логарифм от числа способов, которым может быть реализовано состояние физической системы, характеризующее данным значением энергии. Так ли уж необходимо в физике понятие энтропии? Что ж, вопрос стоит того, чтобы им заняться. Попробуем порассуждать дальше.

Мир движется вниз

Энергия — это мера способности отдельного тела или целой системы совершать работу. Все правильно. Почему же мы постоянно наблюдаем случаи, когда имеются,

например, два тела, обладающие одинаковыми запасами энергии, и при этом одно из них совершает работу, а другое — нет? Аналогичным образом два автомобиля могут обладать в точности равной кинетической энергией, иначе говоря, двигаться со строго одинаковыми скоростями, но навстречу друг другу. Можно ли, пользуясь одним понятием энергии, объяснить, почему автомобиль движется в ту или иную сторону? Конечно, нельзя.

Вопросы о том, почему некоторое тело движется в том или ином направлении, почему те или иные явления происходят в той или иной последовательности, интересовали людей еще в глубокой древности. «Мир движется вниз», — утверждал Демокрит, имея в виду, что во Вселенной есть выделенное направление вниз. Сейчас мы знаем, что ни верха, ни низа у Вселенной нет. Все направления равноправны.

О чем говорит наш повседневный опыт? Если взять полстакана кипятка и долить его холодной водой, то очень скоро температура воды в стакане сравняется и вся вода приобретет температуру, среднюю между температурой кипятка и температурой холодной воды. Через некоторое время температура воды в стакане сравняется с температурой окружающего воздуха.

Разберем процесс выравнивания температур подробнее. Пусть имеются два барабана с шариками — две лотерейные машины, отделенные друг от друга перегородкой. В левом барабане содержится 10 шариков, и общая их энергия равна 10 единицам. В правом барабане содержится тоже 10 шариков, но общая их энергия равна 5 единицам.

Что произойдет, если убрать перегородку? Легко догадаться, что шарики из левой половины начнут сталкиваться с шариками из правой половины, обмениваться энергиями, и скоро система придет в такое состояние, когда в одном общем барабане будет находиться 20 шариков с общей энергией 15 единиц. Как мы установили, подавляющее большинство времени эта новая система будет проводить в таком состоянии, когда энергия равномерно распределена между шариками независимо от того, откуда взялся шарик — из правой или левой половины.

До того как сняли перегородку, статистический вес левого барабана был равен 108 254 (энтропия, $S=11,6$).

Мы по-прежнему считаем, что энергия каждого шарика принимает не более десяти различных значений в одну, две, три и так далее до десяти единиц. В свете наших новых знаний подобное предположение будет справедливо, если за единицу измерения энергии брать энергию шарика, действие которого равно постоянной Планка. Проводя подсчеты, получим, что статистический вес правого сосуда равен 2002 ($S=7,6$).

Статистический вес системы, состоящей из левого и правого сосудов, равен произведению статистических весов правой и левой частей. Как мы пришли к такому выводу? Действительно, пусть в левом сосуде реализуется, например, первый способ. В правом сосуде, который с левым никак не связан, может быть реализован любой из 2002 возможных способов. То же самое справедливо для второго, третьего и так далее способов в левом сосуде. Вот и получается, что статистический вес системы, состоящей из двух и более частей, равен произведению статистических весов каждой части. Энтропия системы, будучи логарифмом от ее статистического веса, равна сумме энтропий составных частей. Говорят, что энтропия аддитивна. В нашем случае она равна 19,2.

Чему равен статистический вес системы после того, как из нее убрали перегородку? Он равен количеству способов, которыми можно распределить энергии 20 шариков по 15 различным уровням при условии, что сумма энергий 20 шариков останется равной 15 единицам. Это количество способов равно 1 855 967 520 ($S=21,3$) — значительно больше, чем произведение статистических весов двух сосудов, разделенных перегородкой. После того как убрали перегородку, движение в системе оказалось направленным в сторону увеличения статистического веса, а следовательно, в сторону возрастания энтропии.

Мы не установили ничего нового, только то, что было сказано в разделе «Кто выиграл?» Правда, там не было перегородки. Она и здесь понадобилась исключительно для наглядности. Просто в системе из 20 шариков в некоторый момент времени оказалось реализованным такое состояние, когда в левой половине объема собралось больше быстрых, а в правой — больше медленных шариков. В полном соответствии со вторым началом термодинамики это состояние сразу сменилось каким-то

другим, более вероятным. Система двигалась в направлении повышения энтропии. Причем, если можно так выразиться, единственной побудительной причиной было то, что состояния с равномерными распределениями энергии между всеми составляющими частицами могут быть реализованы большим числом различных способов и, следовательно, встречаются чаще.

По-другому звучат теперь для нас слова Демокрита.

— Ты был прав,— сказали бы мы нашему мудрому предку.— Мир и впрямь движется вниз, если под словом «вниз» понимать «в сторону увеличения энтропии».

Еще несколько слов по этому поводу. Достигнув состояния, характеризуемого наивысшей энтропией, большую часть времени система будет находиться в этом состоянии. Наблюдая систему в каждый момент, мы могли бы убедиться, что энергия распределяется между шариками (молекулами) каждый раз по-разному, но в подавляющем большинстве случаев равномерно. Состояния с равномерным распределением энергии практически не отличимы друг от друга, и можно сказать, что подавляюще большую часть времени система находится в одном и том же состоянии, в котором ничего не меняется. Синонимом для выражения «ничего не меняется» служит слово «равновесие». Так мы пришли к формулировке очень важного положения: энтропия системы, находящейся в равновесии, равна максимально возможному для данной системы значению.

Каким же законам подчиняются тепловые явления? Во-первых, закону сохранения энергии и, во-вторых, закону неубывания энтропии. Величина энергии показывает, сколько работы может совершить система (как вы скоро увидите, с некоторыми ограничениями), а величина энтропии — куда будет направлена эта работа. Но ни энергия, ни энтропия по отдельности не дают исчерпывающего описания системы. С другой стороны, зная энергию и энтропию, можно предсказать поведение системы настолько точно, насколько это вообще возможно. Закономерности, изучаемые в термодинамике, представляют собой следствия закона сохранения энергии и закона неубывания энтропии, взятых вместе.

Самое замечательное во всем этом следующее. Закон неубывания энтропии есть не что иное, как высказанная другими словами мысль о том, что состояние, в котором все перемешано («все» — это либо энергии мо-

лекул, либо номера лотерейных билстов), реализуется наибольшим возможным числом способов. Аналогичным образом закон сохранения энергии есть только высказанная другими словами мысль о том, что окружающий нас мир симметричен во времени. Действительно, если бы энергия не сохранялась, а, скажем, убывала бы со временем, то рано или поздно полная энергия Вселенной оказалась бы отрицательной и окружающий нас мир стал бы невыразимо иным.

Какова она — температура?

Любые термодинамические, т. е. связанные с теплом, процессы, могут быть исчерпывающим образом описаны, если пользоваться только понятиями энергии и энтропии участвующих в этих процессах тел или систем. Но и у энергии, и у энтропии есть одно неудобное свойство: и та и другая — величины аддитивные. Это означает, что если две системы обладают каждая определенным запасом энергии и определенной величиной энтропии, то после объединения этих систем в одну ее полная энергия (энтропия) будет равна сумме энергий (энтропий) соединившихся частей. Следовательно, величины энергии и энтропии зависят от количества молекул, участвующих в процессах. Конечно, было бы желательно располагать какой-то величиной, не зависящей от количества веществ. Зачем? Ну, например, выходите вы утром на балкон, чтобы узнать, как надо одеться, и получаете исчерпывающую информацию. Вряд ли ощущения, которые вы получаете, выйдя за дверь, зависят от количества наружного воздуха.

Величину, описывающую тепловые процессы и не зависящую от количества вещества, можно получить следующим образом. Сначала надо узнать, что произойдет с энтропией порции идеального газа, если сообщить этой порции дополнительную энергию. Ну что ж, ответить нетрудно. Увеличить энергию порции газа — это значит увеличить энергии отдельных молекул. Больше величина максимально возможной энергии каждой молекулы, больше и количество различных значений, которые может принимать энергия этой молекулы. А раз больше количество различных значений — значит, больше статистический вес. При прочих равных условиях с увеличением энергии увеличивается энтропия.

Предположим теперь, что энергия некоторого объема газа увеличилась на ΔE , а энтропия при этом увеличилась на ΔS . Величину отношения $T = \frac{\Delta E}{\Delta S}$ называют абсолютной температурой, она показывает, насколько изменится энергия тела или системы, если известно, что энтропия изменилась на заданное значение.

Энергия — величина аддитивная. Если рассматриваемая система состоит из молекул, а в общем случае из каких-то частей, то энергия системы равна сумме энергий частей. В случае, когда энергия распределяется между частями равномерно, можно считать, что энергия системы равна некоторой средней энергии, приходящейся на одну часть, помноженной на количество частей. Все то же самое справедливо и для энтропии. Энтропия системы складывается из энтропий составляющих эту систему частей, и в случае равномерного распределения можно считать, что энтропия системы равна некоторой средней энтропии, приходящейся на одну часть, помноженной на количество частей. При равномерном распределении то же справедливо и для приращений энергии и энтропии соответственно ΔE и ΔS . Когда вычисляют отношение $\frac{\Delta E}{\Delta S}$, количества частей в числителе и знаменателе сокращаются. Величина отношения не зависит от количества частей.

Абсолютная температура T и есть то, что мы искали, — термодинамическая величина, не зависящая от количества вещества. Поскольку энтропия — величина безразмерная, размерность температуры совпадает с размерностью энергии. Но говорить, что температура — то же самое, что энергия, например средняя энергия, приходящаяся на одну часть (молекулу), было бы неправильно. Температура — это величина, показывающая, насколько изменяется энергия при данном изменении энтропии. К сожалению, никакого более простого определения придумать не удастся.

Теперь вам ясно, почему мы начали эту главу с намека на то, что температура — понятие тонкое, и обращаться с ним надо с осторожностью? Мы готовы также ответить на вопрос, поставленный в разделе «Можно все, кроме того, что нельзя». Какова связь между выведенным в этом разделе соотношением и уравнением Клапейрона?

Отношение, выведенное в разделе «Можно все, кроме того, что нельзя», представляет собой одну из форм записи соотношения неопределенностей Гейзенберга. Оно справедливо всегда, для всех без исключения физических объектов. Можно рассмотреть один случай, когда система состоит из большого числа частей (молекул) и находится в равновесии как внутри себя, так и с внешней средой. Энтропия такой системы равна своему максимально возможному значению и постоянна. Только в этом случае можно считать, что средняя энергия, приходящаяся на одну часть (молекулу), представляет собой температуру. При таких условиях это соотношение совпадает с уравнением Клапейрона.

Если хотят измерить температуру не в единицах энергии, а в градусах, используют специальный коэффициент пересчета, получивший название постоянной Больцмана и равный $1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/°К. Постоянная Больцмана входит в состав универсальной газовой постоянной. И та, и другая постоянные потому и имеют такой неудобочитаемый вид, что за единицу измерения температуры, названную градусом, без каких-либо на то оснований приняли совершенно произвольную величину, т. е. одну сотую разности между температурой кипения воды и температурой таяния льда.

Настала пора подвести итоги. Два важных обстоятельства мы обсудили достаточно подробно и с разных сторон. Какие? Повторим их кратко.

Первое. Тепловая энергия, или теплота, на самом деле есть обычная механическая, точнее кинетическая, энергия движения большого числа частиц (молекул или атомов). При условии, конечно, что тепловая энергия распределена между ними равномерно, т. е. нет никаких поводов, по которым для отдельных молекул какие-то значения были бы более предпочтительными. Частицы тела, имеющего запас тепловой энергии, непрерывно взаимодействуют друг с другом, обмениваются своими энергиями.

Второе. Тепловые, или термодинамические, процессы исчерпывающим образом описываются двумя законами, получившими название двух начал термодинамики. Оба закона имеют универсальный характер. Первое начало представляет собой следствие симметрии окружающего нас мира во времени, второе же, по существу, не имеет отношения к термодинамике, а есть просто свойство

любой смеси, состоящей из большого числа взаимодействующих друг с другом объектов. Именно простота обоснования первого и второго начал термодинамики обуславливает их универсальность.

Согласно второму началу термодинамики энтропия любой системы, предоставленной самой себе, может лишь увеличиваться, а увеличение энтропии сопровождается установлением равновесия и выравниванием температуры. Наша Вселенная представляет собой физическую систему, по всей вероятности, предоставленную самой себе. Значит, согласно второму началу все процессы во Вселенной направлены к тому, чтобы в ней установилось полное равновесие, температура всех частей стала одинаковой и всякое макроскопическое движение прекратилось. Это и есть гипотеза так называемой тепловой смерти Вселенной. Тепловой не в том смысле, что не хватит тепла, а в том, что всюду станет одинаково тепло. Справедлива ли гипотеза тепловой смерти Вселенной? Попробуем разобраться в этом.

Умрет ли Вселенная?

Сначала попробуем восстановить в памяти ход рассуждений, которые проводятся для обоснования первого и второго начал термодинамики. Первое начало мы приняли безусловно. Что касается второго, то рассуждение о нем каждый раз начинается с предположения, что все частицы, участвующие в процессе, совершенно одинаковы, неразличимы, как зайцы, и энергия между ними распределяется равномерно. А если на самом деле это не так, то рассуждения, приводящие к выражению второго начала термодинамики, окажутся неверными. О том же свидетельствует и опыт. Например, при хорошо известном процессе кристаллизации молекулы стройными рядами располагаются в заранее предназначенных для них местах и ясно, что процесс кристаллизации сопровождается уменьшением энтропии. Правда, кристаллизация, как правило, происходит при охлаждении, т. е. при уменьшении количества тепловой энергии. Но какие-то основания для того, чтобы усомниться во всеобщей значимости второго начала термодинамики, у нас появляются.

Или, скажем, такой вопрос: чему равна энтропия одной молекулы? Если считать, как мы это делали раньше,

молекулу однородным шариком, не имеющим внутренней структуры, то любое ее состояние может быть реализовано одним-единственным способом и, следовательно, энтропия молекулы равна нулю. Так что же, второе начало термодинамики, или, даже проще, понятие энтропии, существует в мире вещей, состоящих из большого числа частиц, и не существует для самих этих частиц?

На самом деле это не так. Не только молекулы, но и элементарные частицы — электроны, протоны, нейтроны — подчиняются соотношению неопределенностей, и любое их состояние может осуществиться, вообще говоря, несколькими способами. Но согласитесь, что здесь уже нет столь простого и ясного обоснования необходимости возрастания энтропии, как для случая, когда все зайцы, то бишь молекулы, одинаковы. Поэтому пока ограничимся утверждением, что второе начало термодинамики, безусловно, справедливо в мире вещей, состоящих из одинаковых, неразличимых частиц. И не станем пророчить гибель миру, который мы познали далеко не до конца.

Третий важный вывод состоит в следующем. Существуют как бы два различных мира. Один — мир реальных вещей, таких, как электроны, протоны, нейтроны, атомные ядра, молекулы. Каждый такой объект обладает некоторым запасом энергии, некоторой скоростью, а вернее, количеством движения, которые можно определить с точностью до соотношения неопределенностей. Современная техника экспериментов не дает нам возможности проследить все события, происходящие с отдельной молекулой, но современный уровень знаний в большинстве случаев позволяет нам описать эти события.

Второй мир — это мир больших вещей: пятаков, зайцев, автомобилей. Мы наивно полагаем, что знаем об этих вещах многое, но на самом деле не можем даже разобраться, тот это пятак или другой. Важнее всего то, что величины, с помощью которых описывается поведение больших вещей, — это, как правило, средние величины. Например, скорость автомобиля — средняя скорость поступательного движения всех его молекул. Что самое замечательное? Скорость автомобиля — это мысленная величина; из всех частиц, составляющих автомобиль, нет ни одной, скорость которой в точности равнялась бы скорости автомобиля. То же самое справедливо

для давления, температуры и других термодинамических величин. Вся классическая физика — это система соотношений между мысленными величинами. Ну а современная квантовая физика?

Каковы они, кванты?

Сейчас нам хочется обсудить одно часто бытующее мнение. Мнение о том, что к квантовой физике следует прибегать лишь при переходе в микромир — мир молекул, атомов и электронов, где все очень маленькое, а поведение больших вещей можно описывать, ограничиваясь законами классической физики.

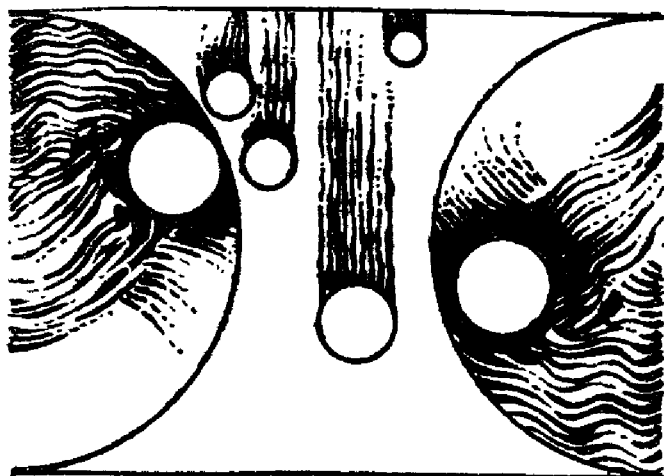
На наш взгляд, это совершенно неправильно. Вы уже имели случай убедиться, что такой «большой» закон термодинамики, как уравнение Клапейрона, по существу, представляет собой просто другую форму записи соотношения неопределенностей Гейзенберга — соотношения чисто квантового. Будучи рассмотренным как следствие соотношения неопределенностей, уравнение Клапейрона сразу теряет свою таинственность, а сказанное остается справедливым независимо от того, рассматриваем мы одну молекулу или несколько кубических метров газа.

При допущении непрерывной делимости энергии, как это делается в классической физике, энтропия теряет смысл, а значит, рушится вся термодинамика. Нечто подобное произошло в конце XIX века. Не существует отдельно классической и отдельно квантовой физики. Существует единая физика, которая описывает мир исходя из основополагающих представлений о конечной делимости, конечной скорости света, законе сохранения энергии и других исходных положений.

Осталось ответить на последний вопрос из числа поставленных в этой главе. Почему постоянная Планка представляет собой такое неудобочитаемое число? Да только потому, что, задавая единицу измерения энергии, человек выбрал один килограмм, т. е. массу, которую он легко может поднять, ощущая при этом, что делает дело, и один метр, т. е. расстояние, несколько большее его шага. С тем же успехом за единицу расстояния можно было бы принять, например, длину прыжка оленя, а за единицу массы — массу одной хвоянки, которую тащит муравей. Ясно, что при этом изменились бы значения всех физических постоянных.

ГЛАВА 2

Движение



О силах

Возьмите концы нитки и потяните в разные стороны, дернули посильнее — нитка разорвалась. Что послужило причиной разрыва нити? Нитка плотно прилегает к пальцам, вы тянете ее с силой, и она, в свою очередь, тоже с силой (сила реакции) врезается в пальцы (если нитка достаточно крепкая, пальцы можно поранить, но этого мы от вас не требуем), сама нитка натягивается все сильнее и наконец разрывается.

Теперь немножко пофантазируйте. Представьте себе, что вы проделываете все то же самое, но смотрите на происходящее через микроскоп, увеличивающий в сотни миллиардов раз. Нитка, как и все, что нас окружает, состоит из молекул. Те, в свою очередь, состоят из атомов. Атомы состоят из ядер и электронов. Радиус атомного ядра, по современным представлениям, имеет порядок 10^{-13} см. Расстояния между атомными ядрами при самой плотной их упаковке не бывают меньше 10^{-8} см.

Вдумайтесь в эти цифры. Расстояние между двумя соседними ядрами в 100 тыс. раз превышает радиусы ядер. Если бы радиус ядра был равен 1 см, то расстояние между двумя соседними ядрами оказалось бы равным 1 км. Человек, обладающий самым острым зрением, не смог бы увидеть два ядра одновременно.

Какую картину вы увидели бы в микроскоп? Нитка представилась бы вам как множество крохотных частичек — ядер (электроны, по современным представлениям, вообще не имеют размеров), отстоящих друг от друга на гигантских по сравнению с их собственными размерами расстояниях. Так же выглядела бы и рука, вернее, та часть руки, которая, по нашему мнению, соприкасается с ниткой. Что самое интересное во всем этом? Ни одно из ядер, составляющих нитку, не только не соприкасается ни с одним из ядер, составляющих руку, но и не приближается к ним на расстояние, меньшее 10^{-8} см, т. е. на расстояние, в 100 тыс. раз превышающее размеры самих ядер. Так как же передается сила от руки к нитке, если она действительно передается? Снова пресловутое дальноедействие? Перед тем как ответить на этот вопрос, отвлечемся немного в сторону.

Садимся за учебник

Берем учебник физики, читаем: «Основные положения динамики были сформулированы Ньютоном в его «Математических началах натуральной философии» (1678)... Первый закон Ньютона может быть сформулирован следующим образом: всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние». И далее: «Второй закон в формулировке, данной самим Ньютоном, гласит: изменение движения пропорционально приложенной силе и происходит в том направлении, в каком действует сила».

Вот откуда она взялась, эта самая сила! Но сначала разберемся с первым законом. Смотрите, как он выражается: «...тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения...» Что значит «тело сохраняет»? Оно само сохраняет или таковы условия его существования во внешней среде? Из всего, что написано дальше в учебнике, вроде бы следует, что тело сохраняет именно само. Физическим телам присуще некое определенное свойство, названное инерционностью. Существует даже мера этого свойства, называемая массой. Все верно.

Справедливость законов Ньютона подтверждает повседневный жизненный опыт. Выпущенная из лука стре-

ла летит, с нашей точки зрения, по прямой до тех пор, пока не столкнется с мишенью. То же происходит с пистолетной или винтовочной пулей. Брошенный камень движется, правда, не по прямой, а по кривой, близкой к параболе, но и этому немедленно находится объяснение. Причина — в притяжении Земли. Земля и есть то самое другое тело, которое, воздействуя на камень, искривляет его траекторию.

Пока все сходится. Но вот выпущен артиллерийский снаряд, причем летит он в космическом пространстве, где нет никаких других воздействующих на него тел. В таком случае его движение строго равномерно и строго прямолинейно. А вот снаряд взорвался — распался на множество осколков. Каждый из осколков отнюдь не продолжает траекторию снаряда, а может отклониться от нее на сколь угодно большой угол. Заметьте, в этом мысленном опыте нет никаких других тел, которые могли бы воздействовать на снаряд. Так что же, первый закон Ньютона несправедлив?

Да, осколки разлетаются в разные стороны, но всякий знает, что существует точка, называемая центром масс, и эта точка продолжает равномерное прямолинейное движение до тех пор, пока хотя бы один из осколков не испытает воздействия со стороны других сил. Так для чего справедлив закон Ньютона — для реальных физических тел или для мысленных точек? Ведь если снаряд находится в космическом пространстве, то его осколки после взрыва могут удалиться от мысленной точки на расстояния в сотни и тысячи километров. Так что же тогда движется прямолинейно и равномерно?

Законы Ньютона, безусловно, справедливы, если для их действия созданы определенные условия. Но содержат они и серьезную слабость, потому что предполагают наличие твердых, не изменяющих свою форму и размеры тел, с каждым из которых связывается мысленная точка, называемая центром масс. Сталкиваемся с ситуацией, уже рассмотренной в первой главе: законы классической физики справедливы не для реальных физических объектов, а для мысленных конструкций.

Но нас интересует не это. Что показал пример со снарядом? Если тело при своем движении распадается на отдельные части, то движение некоторых частей может не продолжать предыдущую траекторию движения тела. Совершенно неважно, каким образом тело распа-

дается на части и движение каких частей рассматривается. Важно, что все такие превращения подчиняются общему физическому закону, который получил название закона сохранения количества движения. Здесь удобно сформулировать его следующим образом: количество движения физической системы, представляющей собой одно тело или множество тел (частей), остается постоянным и может быть изменено лишь в результате взаимодействия с другими физическими системами.

Количество движения — это произведение массы на скорость. Масса физической системы (рассматриваем нерелятивистский случай) равна сумме масс ее частей. Количество движения физической системы равно сумме количеств движения ее частей. Количество движения аддитивно, и это еще одно фундаментальное свойство природы. Следовательно, можно представить себе некоторую скорость, равную сумме скоростей частей физической системы, — она будет оставаться постоянной. Но в общем случае это лишь мысленная скорость, потому что реальной скорости не может быть без объекта, который с этой скоростью движется.

Итак, истинное поведение любой физической системы подчиняется закону сохранения количества движения, который требует, чтобы сумма количеств движения всех частей оставалась постоянной.

Не улетай, Земля, не улетай!

Представьте себе Землю, вращающуюся вокруг Солнца, и нет никакой силы притяжения. Просто Земля — это сложная система, и в процессе своего движения она постоянно испускает маленькие частички (назовем их гравитонами) в направлении, противоположном направлению на Солнце. Система, состоящая из земного шара и гравитонов, точнее, центр масс этой системы, движется прямолинейно и равномерно. Но гравитоны удаляются от Солнца, следовательно, для того чтобы сумма количеств движения оставалась неизменной, земной шар должен все время заворачивать к Солнцу, т. е. двигаться по круговой, точнее эллиптической, орбите. Все происходит, как в случае с разорвавшимся снарядом. Можно считать, что Земля — один осколок, а гравитоны — множество других. Вот видите, все находит объяснение без привлечения понятия силы. Для этого

достаточно допустить существование крохотных частиц с неизвестными пока свойствами.

Конечно, объяснение движения Земли по орбите с помощью гравитонов порождает множество вопросов. Откуда берутся гравитоны? Куда они потом деваются? Почему Земля, непрерывно испускающая гравитоны, рано или поздно не истощит их запасы? Почему те же самые гравитоны не будут излучаться в отсутствие Солнца? На некоторые вопросы можно ответить, но на часть из них современная наука ответов пока не нашла.

Разберем до конца пример с растягиваемой ниткой. Когда концы нити входят во взаимодействие с руками, молекулы (точнее, атомные ядра молекул) пальцев взаимодействуют с молекулами нитки и обмениваются с ними количествами движения. Будем считать, что порции количеств движения от молекул пальцев к молекулам нити переносят некие частицы — кванты. Суть сейчас не в этом, а в том, что количества движения молекул нити изменяются. Эти изменения передаются от одних молекул нити к другим. Сумма количеств движения молекул нити изменяется и, если изменения достаточно велики, нить может разорваться.

Для нас разрыв нити представляется как разрушение чего-то непрерывного, разделение целого на составные части. На самом деле ничего подобного. Нить — это не целое, нить — это множество атомных ядер, расположенных друг от друга на расстояниях, в сотни тысяч раз превышающих их собственные размеры. Разрыв нити означает лишь то, что эти расстояния стали еще больше. Подобное может произойти в результате увеличения количества движения как отдельных ядер, так и всей их совокупности. Но что для этого обязательно требуется, вы теперь знаете: чтобы суммарное количество движения системы «человек плюс нитка» оставалось постоянным.

Отчего устал Атлант?

Трудно ли поднять штангу? Трудно, потому что она тяжелая — давит на руки с большой силой. Попробуем разобраться и в этом. Как свидетельствует древнегреческая мифология, Атлант, сын титана Япета и Климены, родной брат Прометея, за попытку вместе с другими титанами захватить небо был осужден Зевсом дер-

жать на своих плечах небесный свод. Он порядком устал и поэтому охотно согласился на предложение Геракла заменить его ненадолго. Но отчего устал Атлант? Устают от работы, а, удерживая на плечах небо, Атлант никакой работы не совершал. Согласно классической механике работа совершается тогда, когда тело под действием силы проходит какой-то путь. А небесный свод оставался неподвижным.

Поднимая штангу массой, например, 200 кг на высоту около 2 м, штангист совершает работу 400 кгм (3922 Дж). Много это или мало? Видя, как напрягаются мускулы штангиста, мы, конечно, считаем, что много. Но, к примеру, поднимаясь по лестнице, т. е. поднимая свое тело на пятый этаж, вы совершаете работу 900 кгм. И никто не присваивает вам за это спортивных разрядов. Может быть, все дело в том, что по лестнице вы поднимаетесь медленно? Но и штангиста никто не торопит. Хотя вряд ли он согласится поднимать штангу медленнее, чем он это делает.

В чем же дело? Единое, как вам представляется, движение штангиста на самом деле состоит из сокращений и растяжений множества мелких мышц. Деформируясь, каждая мышца узнает о нагрузке и соответственно на нее реагирует. Чем дольше держать штангу на весу, тем больше будет мелких движений, тем больше совершенная мускулами работа, даже если штанга остается неподвижной. От этой-то работы и устал Атлант.

Работа, а не сила создает ощущения. Одно из замечательных достижений кибернетики состоит в том, что доказано — любая передача информации требует затрат энергии или совершения работы (это одно и то же). Если работа не совершается, информация отсутствует, следовательно, отсутствуют и ощущения. То же самое справедливо для температуры. Мы привыкли считать, что, если температура на улице низкая, ощущается холод, а если высокая — тепло. На самом деле важна не абсолютная температура, а разность температур между окружающей средой и человеческим телом. Если температура окружающей среды ниже температуры поверхности тела, тепло переходит от тела к внешней среде. Тело совершает работу, и именно эту работу, а не что-либо другое вы ощущаете как холод. Наоборот, если температура окружающей среды выше температуры те-

ла, тепло перетекает от внешней среды к телу, и это вы ощущаете как тепло. Если же температура внешней среды равна температуре поверхности тела, вы не ощущаете ничего — ни тепла, ни холода.

Не сила, а работа вызывает ощущение тяжести. В статике далеко не всякая задача может быть решена на основе рассмотрения равновесия сил. В простейшем случае, когда балка опирается на три опоры, уже нельзя определить, как распределяются силы между этими опорами. Такие системы называют статически неопределимыми. Для расчета статически неопределимых систем используют принцип виртуальных (возможных) перемещений. Задают системе малое перемещение и ведут расчеты из тех условий, чтобы сумма работ, совершенных внешними силами, оказалась равной сумме работ, совершенных силами реакции опор.

Но почему мы так ополчились на силу? Что ни говори, но уже несколько столетий понятие силы верой и правдой служит человечеству. Оно лежит в основе не только классической механики, но и классической электродинамики. С помощью уравнений, в состав которых входит сила, решено множество замечательных задач. В частности, было предсказано существование еще неоткрытой планеты. Все так, но в этой книге мы ставим себе цель понять, почему происходят те или иные явления или, что то же самое, как зависит проявление одной физической сущности от проявления другой физической сущности. Понять это трудно, когда имеешь дело с сущностями, которые то есть, то их нет.

В этой главе мы хотим понять, как происходят взаимные превращения тепловой и механической энергии. Исходим из реальной картины мира, т. е. считаем, что все без исключения тела состоят из молекул, молекулы, в свою очередь, — из атомов. Другими словами, любое тело, будь оно твердое, жидкое или газообразное, есть множество атомных ядер, расположенных друг от друга на расстояниях, в сотни тысяч раз превышающих их собственные размеры. Подобный взгляд на вещи, в частности, заставляет нас самым категорическим образом отказаться от представления о стенках, которые ограничивают объем с газом в классической термодинамике и о которые якобы ударяются молекулы, создавая силу, называемую давлением. Такие стенки просто не из чего изготовить. Что можно предположить? Молеку-

лы стенок расположены ближе друг к другу, чем молекулы газа. Но и это несущественно.

Отказавшись от понятия силы, давайте рассматривать взаимодействие между молекулами газа и молекулами стенок как обмен количествами движения. Пока объем остается постоянным, сумма количеств движения отдельно молекул газа и отдельно молекул стенок, а также и тех и других, взятых вместе, равна нулю. Может ли быть такое при неравенстве нулю количеств движения отдельных молекул? Да, потому что количество движения, будучи произведением массы на скорость, имеет не только величину, но и направление. Два количества движения, направленные в противоположные стороны, взаимно вычитаются.

Изменение объема означает, что сумма количеств движения перестала быть равной нулю. Выделяется некоторое преимущественное направление, куда направлен вектор суммы количеств движения. Зная об энтропии, вы даже можете сразу сказать, куда. Направлен он так, чтобы происходящее в этом направлении движение сопровождалось повышением энтропии системы газ — стенки. До чего все оказывается просто, если опереться на систему правильных представлений!

Как связано количество движения с энергией и работой? Предположим, что некоторое тело или система тел в какой-то момент времени обладало скоростью v_1 и, следовательно, кинетической энергией, равной $\frac{mv_1^2}{2}$, где m — масса тела (системы тел). Предположим далее, что скорость менялась и стала равной v_2 . Подсчитаем разность энергий

$$\Delta E = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \frac{m}{2} (v_2^2 - v_1^2).$$

Разность квадратов двух чисел есть произведение суммы этих чисел на их разность. Обозначим разность $(v_2 - v_1)$ через Δv и напомним

$$\Delta E = \frac{m}{2} (v_2 + v_1) \Delta v.$$

Предположим теперь, что скорость изменилась очень мало и сумму $v_2 + v_1$ можно считать равной удвоенному значению некоторой средней скорости $2v$. Тогда полу-

чится $\Delta E = mv\Delta v$. Но произведение массы на скорость — это количество движения. Получаем окончательно $\Delta E = p\Delta v$, где $p = mv$ — количество движения. Иными словами, количество движения есть величина, которая показывает, на сколько изменится энергия тела (системы тел), если его скорость изменится на Δv .

Вспоминая материал предыдущей главы, можно сказать, что между температурой и количеством движения есть кое-что общее. Только в отличие от температуры количество движения — величина аддитивная, подчиняющаяся закону сохранения. Закон сохранения количества движения, как и закон сохранения энергии, представляет собой следствие некоторого простого утверждения: свойства нашей Вселенной не изменяются при перемещении в ней от одной точки пространства-времени к другой по прямым линиям. Говорят, что Вселенная симметрична по отношению к параллельным переносам.

Как можно было бы объяснить, тот факт, что количество движения изолированной физической системы не сохранилось? Двигаясь прямолинейно и равномерно с постоянной скоростью, она приобретала бы другие свойства (другое количество движения). А если система изолированная, это возможно только в том случае, если бы она попала в другую среду с другими свойствами. В том-то и сила законов сохранения, что их не надо объяснять. Они сами собой вытекают из имеющихся на сегодня сведений о некоторых общих свойствах Вселенной.

Из Софии в Пловдив

Не скроем, что замысел этой книги возник у нас во время путешествия из Софии в Пловдив. Перенесемся в «Волгу», несущуюся по новенькому шоссе. Куда и с какой скоростью она движется? Предположим, что скорость «Волги» равна 120 км/ч, или 3333 см/с. Это скорость автомобиля, рассматриваемого как единое целое. Но мы уже твердо решили ничего не рассматривать как единое целое, потому что при этом, как правило, теряешь самое главное. «Волга» для нас — это облако, состоящее из молекул, которые к тому же непрерывно обновляются. Какая-то часть из них отлетает назад вместе с выхлопными газами, какая-то часть добавляется, например, вместе с частицами пыли, налипающими на ветро-

вое стекло. Но это обновление нас пока не интересует. Интересует нас вопрос: какова средняя скорость одной молекулы?

Температура «Волги» равна, скажем, 23°C , или 300 K . Этому соответствует средняя энергия, приходящаяся на одну молекулу, $4,14 \cdot 10^{-14}$ эрг (температуру мы умножили на постоянную Больцмана). Средняя масса молекулы равна $3,3 \cdot 10^{-23}$ г (масса 20 протонов). Подсчитываем на карманном калькуляторе и получаем среднюю скорость молекулы $50\,000\text{ см/с}$. Что же отсюда следует? Среди молекул, составляющих «Волгу», несущуюся в Пловдив со скоростью 120 км/ч встречаются такие, которые движутся по направлению из Пловдива в Софию со скоростью, в 10 раз большей. Подобных молекул не так уж мало. Если считать все направления движения молекул равновероятными, то в направлении, противоположном направлению движения «Волги», каждый раз движется около половины молекул, правда, с различными скоростями.

То, что мы называем скоростью движения «Волги», и то, что мы воспринимаем как таковую, получается следующим образом. Нужно сложить между собой количества движения всех молекул и полученную сумму разделить на массу «Волги», т. е. опять-таки на сумму масс всех молекул. Еще раз подтвердилась важность понятия количества движения. Но хватит разъезжать в чужих автомобилях, пора изобрести свой, ни на что не похожий.

Антиавтомобиль

Энергия не исчезает и не возникает из ничего, поэтому источником энергии может быть только система, способная энергию накапливать. Не желаете ли принять участие в одном необычном деле? Давайте изобретем автомобиль наоборот или, если хотите, антиавтомобиль. Но прежде надо решить одну проблему. В вашем распоряжении имеется 1 кг водяного пара с температурой чуть больше 100°C и 1 кг льда с температурой -100°C . Что вы предпочтете для приведения в движение даже не автомобиля, а хотя бы игрушечной тележки?

— Конечно, пар,— наверное, ответите вы.— Что же тут сомневаться? Пар вращает огромные турбины, да и, вообще, горячий пар содержит большой запас энергии, чем холодный лед.

Вы, несомненно, правы, но, чтобы привести в движение игрушечный или настоящий автомобиль, лед может послужить ничуть не хуже водяного пара. Водяной пар совершает работу потому, что его температура выше температуры окружающего воздуха. С тем же успехом можно использовать какую-нибудь жидкость с температурой кипения, скажем, -80°C .

Проведите сначала такой опыт. Обложите закупоренную бутылку с низкокипящей жидкостью кусками льда, температура которого -100°C . Как вы думаете, что-нибудь случится? Ничего особенного, жидкость останется жидкостью.

Тогда откройте пробку. Пусть теперь жидкость соприкоснется с окружающей средой, имеющей температуру, предположим, 0°C (ни зима, ни лето). Теперь кое-что случится: жидкость закипит, ведь температура ее кипения на 80° ниже температуры окружающей среды. В результате кипения образуется пар, который сразу же нагревается до 0°C . Он совершает работу ничуть не хуже водяного пара, хотя его температура нуль градусов, а не сто. Отработавший и поэтому охладившийся пар направьте в холодильник. Отдав льду остатки тепла, полученного от окружающей среды, пар превратится в жидкость, и все начнется сначала.

Проект антиавтомобиля готов. Заливаете в герметически закрывающуюся систему низкокипящую жидкость (физики говорят, рабочее тело). Обкладываете топливный бак льдом. Можно ехать. От соприкосновения с отработавшим паром лед постепенно нагревается и тает. Не беда. Проехав определенное количество километров, подъезжаете к заправочной станции, где вместо бензоколонок установлены электрические холодильники. Переливаете воду (растаявший лед) из бака в холодильник. Через несколько минут вынимаете из холодильника брикеты льда, загружаете их в бак и едете дальше. Что важно? Жидкость с низкой температурой кипения не расходуется, и ее запаса возобновлять не надо.

Интересная подробность. Нашему антиавтомобилю так же, как и обычному автомобилю, необходим радиатор, но выполняет он противоположную задачу. Вы уже поняли, в чем разница? В том, что у обычного автомобиля радиатор служит для охлаждения двигателя, а у антиавтомобиля все наоборот: радиатор нужен для нагревания низкокипящей жидкости и превращения ее в

пар. Змеевик обложен льдом. В змеевике отработавший пар конденсируется и превращается в жидкость. Жидкость поступает в радиатор, обдуваемый воздухом, нагревается, превращается в пар. Пар приводит в движение мотор и, отработав свое, снова попадает в холодильник.

Вы обратили внимание на замечательную особенность антиавтомобиля? Никаких выхлопных газов, никаких отходов. Нефть для изготовления автомобильного бензина выкачивают из недр земли. Лед для антиавтомобилей можно добывать, например, в Антарктиде, где на станции «Восток» температура редко поднимается выше -50°C . Всю дальнейшую разработку этой идеи предоставляем читателю.

Польза энергии

Теперь вы знаете, что, располагая запасом тепловой энергии, можно сделать что-нибудь полезное, например заставить ехать антиавтомобиль. Изучением движения занимается наука механика, поэтому энергию, приводящую в движение автомобиль, принято называть механической. Мы установили, что тепловая энергия на самом деле никакая не тепловая, а обычная механическая, иначе говоря, кинетическая энергия движущихся молекул. Правда, с одной существенной оговоркой. Считается, что тело не обладает никакой другой энергией, кроме тепловой, если молекулы двигаются беспорядочно и сумма их количеств движения равна нулю. Условие равенства нулю суммы количеств движения при неравной нулю тепловой энергии — это и есть более строгая формулировка представления о полной беспорядочности движения молекул. При этом тело, конечно, может обладать еще химической, электрической или атомной энергией, но если эти виды энергии в течение некоторого времени не преобразуются в тепло, на это время можно просто о них забыть. Вспомним о них мы в следующих главах.

Механическая энергия физических тел бывает двух видов: кинетическая и потенциальная. Различие между ними усмотреть не так просто, как кажется на первый взгляд. Пока будем считать, что кинетической энергией обладают движущиеся тела, а потенциальной — неподвижные. Движущееся тело — это такое тело, у которого сумма количеств движения всех его молекул не

равна нулю. Сумма количеств движения — вектор, и направление этого вектора в каждый момент времени совпадает с направлением движения тела.

Каков же вывод из сказанного? Механическая энергия движущегося тела — это энергия частично упорядоченного движения молекул. Преобразовать тепловую энергию в механическую — это значит навести среди беспорядочно движущихся молекул частичный порядок. Как и при каких условиях это можно сделать?

Взаимные преобразования тепловой и механической энергии интересовали ученых с глубокой древности, но только к середине XIX века в этот вопрос была внесена полная ясность. Понадобилось выполнить огромное количество опытов, в частности опытов Джоуля, которые он проводил в течение тридцати лет. Привлекались и мысленные модели, в том числе так называемые циклы Карно, предложенные французским инженером Сади Карно. Сегодня циклы Карно приводятся во всех учебниках термодинамики. Циклы Карно положены в основу индикаторных диаграмм, с помощью которых описывается работа двигателей внутреннего сгорания и турбин.

На этом фоне нам особенно приятно показать, насколько просто решается вопрос о взаимных преобразованиях тепловой и механической энергии, если пользоваться понятиями энтропии, энергии и количества движения. Рассмотрим некоторую теплоизолированную физическую систему. Для начала будем считать, что система находится в равновесии, т. е. энтропия равна своему максимально возможному значению, температура постоянна и одинакова во всех точках системы. Что означает для такой системы совершить некоторое количество механической работы или отдать часть своей энергии, преобразовав ее предварительно в какой-либо другой вид (кроме теплового, ведь система теплоизолирована)?

Это значит уменьшить энтропию. Поскольку приращение энтропии равно приращению энергии, поделенному на температуру, при постоянной температуре уменьшение энергии (отрицательное приращение) неизбежно должно сопровождаться уменьшением энтропии. Однако согласно второму началу термодинамики энтропия не может самопроизвольно уменьшаться. Отсюда первый вывод: в теплоизолированной системе, находящейся в равновесии, невозможно преобразование даже самой малой

части ее тепловой энергии в какой-либо другой вид энергии.

Представьте теперь теплоизолированную систему, не находящуюся в равновесии. Что это означает? В пределах системы можно выделить отдельные области или отдельные тела с различными температурами. Предположим для простоты, что система состоит из двух таких тел, причем температура одного из них равна T_1 , а второго — T_2 , причем $T_1 > T_2$. При таких условиях реализуются не все возможные способы распределения энергии по молекулам и, следовательно, энтропия системы меньше максимально возможной. С этим мы сталкивались на примере двух сосудов с шариками.

Если дать возможность теплу переходить от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой, энтропия системы в общем случае будет повышаться. Если одновременно с этим часть тепловой энергии преобразовывать в какой-нибудь другой вид, энтропия системы должна уменьшаться. Итак, имеем два процесса: один из них — установление равновесия — сопровождается повышением энтропии, а второй — преобразование тепловой энергии в какой-нибудь другой вид — понижением энтропии.

Какое максимальное количество энергии другого вида можно получить от неравновесной физической системы, обладающей запасом тепловой энергии? Ответ получаем немедленно. Это то самое количество энергии, которое вызывает понижение энтропии. По абсолютной величине оно не больше той величины, на которую повысилась бы энтропия системы, если бы процесс установления равновесия совершался без преобразования и отвода от системы какого-то количества энергии. Другими словами, наибольшее количество нетепловой энергии можно получить от неравновесной физической системы в том случае, если в процессе преобразования ее энтропия будет оставаться постоянной.

Приведем интересные выкладки. При этом для простоты будем оперировать с количествами энергии, очень малыми по сравнению с полными запасами энергии. Изменения энергии тел на подобные величины практически не влекут за собой изменения их температуры. Пусть тело с температурой T_1 отдает некоторое количество энергии (тепла) ΔQ_1 . Оно частично преобразуется, например, в механическую работу, количество которой

равно ΔR , а частично передается телу с температурой T_2 . Количество тепла, переданного телу с температурой T_2 , равно ΔQ_2 . В результате получаем $\Delta Q_1 = \Delta R + \Delta Q_2$.

Поскольку температуры по условию остаются неизменными,

$$\frac{\Delta Q_1}{T_1} = \Delta S_1 \text{ и } \frac{\Delta Q_2}{T_2} = \Delta S_2.$$

Максимальное количество работы будет получено, если $\Delta S_1 - \Delta S_2 = 0$, т. е. при условии, что энтропия системы остается постоянной. Получаем непосредственно

$$\Delta R = \Delta Q \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Величина

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

получила название коэффициента полезного действия. Коэффициент полезного действия всегда меньше единицы и приближается к единице лишь по мере приближения температуры одного из тел к температуре абсолютного нуля. Второй вывод, который можно сделать из сказанного: только неравновесные теплоизолированные системы способны отдать часть своей энергии в виде, преобразованном в другую форму.

Теперь прояснилось сделанное в начале книги замечание по поводу разговоров об энергетическом кризисе. Запасы тепловой энергии в такой системе, как Земля вместе с окружающей ее атмосферой, практически остаются неизменными. А если и изменяются, то чрезвычайно медленно на протяжении тысячелетий. Так что на недостаток энергии пожаловаться нельзя. Иное дело возможности преобразования. Всякий раз, чтобы получить какое-то количество нетепловой энергии, мы переводим до этого неравновесную систему в состояние, находящееся ближе к равновесному.

Переход из неравновесного состояния в равновесное совершается самопроизвольно, причем он может проходить как с преобразованием, так и без преобразования тепловой энергии в другие виды энергии. А обратный процесс — процесс перехода систем из равновесного в неравновесное состояние — самопроизвольно идти не может. В этом и состоит великий смысл второго начала термодинамики. Дефицит для человечества составляют

не запасы энергии — при всем желании мы не можем не только исчерпать их, но и хоть как-то уменьшить, а запасы неравновесных систем. Энергия, получаемая от Солнца, частично затрачивается как раз на создание неравновесных систем, например, при нагревании не всей земной атмосферы, а лишь какой-то ее части.

Нужна ли опора?

До сих пор мы говорили в основном о преобразовании тепловой энергии в механическую. Ведь перед тем как рассматривать какое-то явление, важно узнать его причину. Разобравшись в причине, можно еще раз все подытожить. В мире макроскопических объектов, т. е. тел, состоящих из большого количества отдельных частей, всякое движение совершается в сторону увеличения энтропии. Сказав это, мы перейдем к рассмотрению самого движения, точнее, некоторых его сторон, представляющих, на наш взгляд, особый интерес.

Рассуждения о движении окажутся самыми простыми и понятными, если в основу их класть закон сохранения количества движения, который понадобится нам чуть позже. Между прочим, закон сохранения количества движения пытались опровергать точно так же, как пытались опровергать первое и второе начала термодинамики бесчисленные изобретатели вечных двигателей. Последняя эпидемия опровержений закона сохранения количества движения разразилась в нашей стране относительно недавно, чуть больше десятилетия назад, когда проходила довольно бурная дискуссия о так называемых безопорных движителях.

Опровергнуть закон сохранения количества движения невозможно, потому что он представляет собой следствие достаточно простого и очевидного утверждения о пространственной симметрии окружающего нас мира. Интересно другое. Откуда у человека вообще такая страсть опровергать физические законы? С одной стороны, это делается, конечно, из наилучших побуждений. И вечные двигатели и безопорные движители, если бы они были осуществимы, принесли бы человечеству большую пользу. Но наверное, следует признать и то, что причина кроется в плохом преподавании физики. Чем более сложно и запутанно излагается некоторое положение, тем менее оно убедительно, тем естественнее желание отыскать в

нем слабые места и опровергнуть. Кроме того, с понятием энергии учащиеся знакомятся относительно рано, еще в школе, а понятие энтропии всерьез изучается лишь в вузах, да и то не во всех. А ведь только взятые вместе, они создают цельную и непротиворечивую картину.

То же самое относится к делению физики на классическую и релятивистскую, квантовую. Мы отнюдь не против классической физики. Она представляет собой весьма заметную составную часть человеческой культуры в целом. И сегодня множество практических задач можно решать, оставаясь в рамках классической физики. Но с позиций сегодняшнего знания очевидно, что классическая физика описывает не столько реально существующий мир, сколько ту картину мира, которая порождена нашими непосредственными ощущениями. В этом смысле классическая физика содержит целый ряд заблуждений. Нужно ли повторять их в процессе обучения в школе с тем, чтобы в конце концов прийти к выводу, что на самом деле все обстоит не так, а вот так?

Конечно, можно сослаться на то, что картина мира, описываемая в классической физике, в большой степени соответствует картине, создаваемой в нашем сознании на основе повседневного опыта. Так ли это на самом деле? Напротив, ничто из нашего повседневного опыта не говорит о том, что Земля имеет форму шара. Ссылка на то, что подобному представлению якобы способствует наблюдение за линией горизонта или за формой тени, отбрасываемой Землей на Луну, малоубедительна. В повести А. и Б. Стругацких «Обитаемый остров» есть такой эпизод:

«Максим, совершенно обалдевший от неожиданности, пустился было в спор, но очень скоро оказалось, что они с Гаем говорят на разных языках, что понять друг друга им гораздо труднее, чем убежденному коперниканцу понять убежденного последователя Птолемея. Все дело было в удивительных свойствах атмосферы этой планеты. Во-первых, необычайно сильная рефракция непомерно задирала горизонт и спокон веков внушала аборигенам, что их земля не плоская и уж во всяком случае не выпуклая — она вогнутая. «Встаньте на морском берегу, — рекомендовали школьные учебники, — и проследите за движением корабля, отошедшего от пристани. Сначала он будет двигаться как бы по плоскости, но чем дальше он будет уходить, тем выше он будет поднимать-

ся, пока не скроется в атмосферной дымке, заслоняющей остальную часть Мира... Максим понял, что находится в гигантской ловушке, что контакт сделается возможным только тогда, когда ему удастся буквально вывернуть наизнанку естественные представления, сложившиеся в течение тысячелетий. По-видимому, это уже пытались здесь проделать, если судить по распространенному проклятию «массаракш», что дословно означало «мир наизнанку».

Земля, имеющая форму диска, при определенной ориентации тоже отбрасывала бы круглую тень. Так что дело не в наших представлениях. С детства нам повторяют, что Земля шарообразная. Постепенно это представление становится привычным, и мы начинаем им пользоваться как фрагментом при построении сложных мысленных моделей. То же самое и с физикой. Ведь если бы мы в школе начинали с изучения хотя бы основных положений современной физики, в дальнейшем законы классической физики можно было бы объяснить, в то время как сейчас их приходится заучивать. Нечто подобное произошло в свое время с преподаванием математики. Было принято решение начать изучение математики с самых ее основ, т. е. с теории множеств. Подобное решение вызвало много споров, но вот прошло достаточно времени, и жизнь показала, что оно было совершенно правильным. Не пора ли сделать то же самое с физикой?

А может быть, не нужно никаких законов? Если просто утверждать, что дела обстоят так-то и так-то, поскольку об этом свидетельствует эксперимент, то, казалось бы, на основании подобного знания можно получить те же практические результаты. Это неверно. Основная причина в том, что человеческое мышление основано на законах логики. Стоит поставить под сомнение эти законы, как сами процессы мышления вообще потеряют какой-либо смысл. Именно так обстояло дело у средневековых схоластов, которые затрачивали часы, а подчас и целые жизни на жаркие споры о том, сколько дьяволов может разместиться на кончике иглы, или, если бог всемогущ, то может ли он создать такой камень, который сам потом не сможет поднять.

Что такое ракета?

Вернемся, однако, к безопорным движителям. В чем состояла суть проблемы? Количество движения сохраняется неизменным. Если некое тело до определенного момента времени было неподвижным (количество движения равно нулю), то оно может прийти в движение только в том случае, если какое-нибудь другое тело или система тел приобретает при этом количество движения, равное по величине и противоположное по направлению количеству движения, приобретаемому начавшим двигаться телом.

На шоссе стоит автомобиль. Его количество движения равно нулю. Вот автомобиль начал двигаться, разогнался до скорости 100 км/ч и приобрел количество движения, равное этой скорости, помноженной на массу автомобиля. Спрашивается, какое другое тело или система тел приобрела при этом равное по величине и направленное в противоположную сторону количество движения? Отвечаем, не задумываясь: земной шар. Дополнительная скорость, которую приобрел при этом земной шар, во столько же раз меньше скорости автомобиля, во сколько раз масса земного шара больше массы автомобиля. Она настолько мала, что мы ее, естественно, не замечаем. А не замечаем — начинаем строить всякие предположения о возможности безопорного движения.

Говорят: автомобиль отталкивается от шоссе колесами. Слово «отталкивается» тоже порождает всякого рода неточности. Отсюда, кстати, и термин «опорное» или «безопорное». Можно привести много примеров, когда вроде бы ничто ни от чего не отталкивается и тем не менее движение является опорным в том смысле, что закон сохранения количества движения соблюдается неукоснительно. Лучший пример — ракета.

Что такое ракета? На этот вопрос сегодня ответит любой школьник. Если говорить просто, то ракета — это бутылка с открытым горлышком. Бутылка заполнена таким топливом, которое может гореть без использования наружного воздуха, например порохом. Когда порох поджигают, образуются продукты сгорания — газы. Газы с одинаковой силой давят во все стороны. Силы давления на стенки бутылки уравнивают друг друга. А сила давления газов на дно ничем не уравнивается, потому что с противоположной стороны находит-

ся открытое горлышко. Газы вырываются через горлышко, а неуравновешенные силы давления на дно толкают бутылку. Как говорят, создается сила тяги. Если бутылку ничто не удерживает, она полетит дном вперед и будет двигаться со всевозрастающей скоростью, пока не сгорит топливо.

Подобные явления можно часто наблюдать в жизни. Достаточно, например, взять воздушный шарик и разрезать нитку, затягивающую отверстие, через которое шарик надули. Воздух или газ, наполняющий шарик, будет выходить через отверстие, а сам шарик станет, вероятнее всего, беспорядочно метаться по комнате. Приглядевшись, вы увидите, что как бы ни двигался шарик, он всегда летит в сторону, противоположную открытому отверстию.

В качестве топлива для простейшей ракеты совсем не обязательно пользоваться таким опасным веществом, как порох. Для получения тяги нужен не сам порох, а те газы, которые образуются в результате его горения. Именно они создают давление. В случае с шариком роль таких газов выполнял сжатый воздух. Для построения ракеты или, точнее, ракетного двигателя необходимы, по крайней мере, три компонента. Во-первых, сосуд, закрытый со всех сторон, кроме одной. Во-вторых, вещество, наполняющее этот сосуд. Такое вещество называют рабочим телом ракетного двигателя, и это совсем не обязательно газ — можно налить в бутылку какой-нибудь горючей жидкости. Наконец, в-третьих, нужен источник энергии, который создавал бы давление в рабочем веществе и заставлял бы его вырываться через отверстие в сосуде и давить на противоположную сторону сосуда, создавая силу тяги.

Принцип ракетного двигателя известен человечеству уже более 2 тыс. лет. Еще во II веке до нашей эры Герон Александрийский изобрел свою паровую машину — эолипил. Под котлом с водой раскладывали костер. Образующийся пар поступал в полый шар, укрепленный на горизонтальной оси. Из шара пар вырывался через две изогнутые трубки. Под давлением, как мы теперь говорим, реактивной силы шар вращался в направлении, противоположном движению выходящего пара.

Неуравновешенные силы давления толкают дно бутылки, создавая силу тяги. Прекрасный случай убедиться, насколько зыбким является понятие силы. Во-пер-

вых, с самого начала исходят из того, что газ, находящийся в замкнутом сосуде, оказывает на все его стенки одинаковое давление. Собственно говоря, почему? Это утверждение (так называемый закон Паскаля) является обобщением огромного числа опытов, и только. Но если все же это не так?

Давайте рассуждать дальше. Если мы готовы принять на веру, что в бутылке, заткнутой пробкой, давление всюду одинаковое, то кто сказал, что давление на доньшко должно оставаться неизменным после того, как выдернута пробка? Это совсем не очевидно. Неубедительность приведенного описания принципа действия ракеты служит поводом для всевозможных сомнений, в том числе и для изобретения безопорных движителей. До чего же все станет просто и ясно, если с самого начала четко представить себе, что на самом деле ракета никуда не движется.

Неподвижная ракета

Сочетание слов «неподвижная ракета» напоминает сочетание «холодный огонь» или «безмолвный водопад». Все же надо разобраться. Для этого отправимся подалее в открытый космос, прихватив с собой ракету. Открытый космос нужен для того, чтобы не было рядом никаких других тел или полей, могущих, как говорят, нарушить чистоту эксперимента.

Ракета в нашем опыте — просто бутылка, наполненная веществом, способным гореть без участия окружающего воздуха. Кроме ракеты, нужны спички. Предоставим ракете свободно и неподвижно висеть в пространстве, т. е. сообщим ей состояние покоя. А затем подожжем порох.

Из горлышка ударила струя ослепительного пламени. А что происходит с ракетой? Двигается она или нет? Весь вопрос в том, что понимать под словами «ракета» и «двигается». Если под словом «ракета» понимать систему, состоящую из бутылки и наполняющего ее топлива, а под словом «двигается» — движение центра масс, ответ совершенно очевиден: нет, не движется. Рассуждая с позиций первого закона Ньютона, можно сказать так. До того как подожгли порох, центр масс системы находился в состоянии покоя. Он будет сохранять это состояние и после того, как порох подожгли. Не было никакой

другой силы взаимодействия, которая могла бы вывести центр масс из состояния покоя.

С позиций закона сохранения количества движения все то же самое будет звучать так. Сумма количеств движения системы бутылка — порох была равна нулю. Она и останется равной нулю после поджигания пороха, поскольку опять-таки отсутствует другое тело или другая система тел, которая могла бы приобрести какое-то количество движения и тем самым дать возможность системе бутылка — порох приобрести такое же, но противоположно направленное количество движения.

Итак, центр масс ракеты остался неподвижным. Попробуем определить словом «движение» перемещение отдельных частей системы относительно центра масс. Такое перемещение действительно совершается. Не станем пока говорить о законах, которым оно подчиняется, а понаблюдаем, что происходит.

Бутылка движется в одном направлении, а струя выброшенных из ее горлышка газов — продуктов сгорания пороха — в противоположном. Законы, которым подчиняются эти движения, выводятся достаточно легко. Бутылка состоит из множества частиц, обладающих массой, — молекул, а выражаясь более наглядно, дробинок. Струю газа также можно представить себе состоящей из подобных частиц. Какому основному закону должно подчиняться движение всей системы? Бутылка может двигаться лишь таким образом, при котором сумма количеств движения составляющих ее частиц окажется равной сумме количеств движения частиц, составляющих газовую струю, но направленных в противоположную сторону. Чем легче частица, тем в общем случае больше ее скорость. А полная сумма количеств движения частиц остается постоянной.

Очевидное свойство ракеты, точнее системы, состоящей из бутылки и выхлопных газов, — это свойство изменять свои размеры, как бы растягиваться в пространстве. Если все сказанное раньше относительно центра масс справедливо для любого тела, состоящего из частиц, — твердого, жидкого или газообразного, то можно смело уподобить ракету палке, которая под воздействием внутренних сил увеличивает свою длину. Поместив такую палку в открытый космос на место ракеты, вы не увидите ничего нового. Палка начала удли-

няться: ее центр масс остается на месте, а концы отодвигаются от него в разные стороны.

Что еще сказать? Если один из концов палки по каким-то причинам оказался тяжелее, он отодвинется на меньшее расстояние, а более легкий конец — на большее расстояние. Сама же палка, понимаемая как единое целое, будет оставаться неподвижной. Зафиксируем некоторый момент времени. К этому моменту легкий конец палки отодвинулся от центра масс несколько дальше, чем тяжелый конец. Но с начала опыта до момента наблюдения прошло определенное количество времени. За этот период легкий конец прошел большее расстояние, а тяжелый — меньшее. Значит, при «ракетном», реактивном, движении легкое тело или более легкие частицы движутся с большей скоростью.

Все только что сказанное представляет собой словесную формулировку знаменитой формулы Циолковского. Но мы твердо решили обойтись без математических формул. Заметим другое: из всех литературных героев ближе всех к идее путешествия в космос, в частности путешествия на Луну, оказался барон Мюнхгаузен. Он посадил в землю семечко быстрорастущего бобового растения, подождал, пока оно дорастет до Луны, а затем взобрался по стволу. Но разве ствол растущего бобового растения не то же самое, что растущая палка?

Поместим теперь в облюбованный нами уголок открытого космоса цветочный горшок с землей, в которую посажено бобовое зернышко. Вот оно проросло, появились первые листочки. Длина ствола, как это свойственно бобовым, быстро увеличивается. И что дальше? Да все то же самое. Центр масс остается неподвижным — он расположен где-то внутри цветочного горшка. Ствол отодвигается в одну сторону от центра масс точно так же, как это делали выхлопные газы, а горшок (ракета) — в другую. Но горшок во много раз тяжелее растения, поэтому он перемещается на меньшее расстояние и движется с меньшей скоростью. Легкий ствол и движется быстрее, и конец его уходит дальше.

На примере цветочного горшка с бобовым семенем тоже можно установить основные законы реактивного движения. Этим законам должен подчиняться любой аппарат, действующий по тому же принципу. А коли так, то изучать его поведение можно на примере цветочного горшка. Как говорят ученые, цветочный горшок с бобо-

вым семенем может служить для нас моделью (бобовой) реактивного движущегося аппарата. Главный закон гласит так: при отсутствии взаимодействия с другими телами отдельные части системы цветочный горшок — бобовое растение могут совершать лишь такие движения, при которых положение центра масс останется неизменным.

Потенциал

На этом пока распрощаемся с ракетами и вспомним, что до сих пор мы говорили только о кинетической энергии, хотя существует и другой вид энергии — потенциальная. Понятие потенциальной энергии связывается с понятием силового поля и его потенциала. Говорят, что в данной области пространства действует силовое поле, а данная точка пространства обладает потенциалом данной величины, если на то, чтобы доставить некий единичный пробный объект из бесконечности в данную точку, необходимо затратить количество работы, численно равное значению потенциала в этой точке.

Смотрите, сразу сколько неясностей! Не станем даже говорить о бесконечности, в которую всякий раз надо отправляться за пробным объектом, а потом тащить его в данную точку поля, подсчитывая при этом совершенную работу. Хуже другое — непонятно, что обладает потенциальной энергией: само поле или внесенный в него объект? С одной стороны, вроде бы само поле, ведь любая его точка обладает потенциалом независимо от того, внесен туда объект или нет. А с другой стороны, вроде бы объект, ведь в одной и той же точке потенциального гравитационного поля объект с вдвое большей массой обладает вдвое большей потенциальной энергией.

Все это так сложно, что невольно задаешь себе вопрос: существует ли на самом деле потенциальная энергия? Можно ли исчерпывающим образом описать все процессы, изучаемые в механике, не пользуясь понятием потенциальной энергии? К постановке подобных вопросов нас побуждает множество примеров, которые так охотно приводят в книгах с заголовками, начинающимися со слов «Занимательная» или «Занимательные», например, куда девается потенциальная энергия свернутой пружины, если растворить эту пружину в кислоте?

Насколько важно для нас понятие потенциальной

энергии? Вот камень, покоящийся на вершине горы. Потенциальная энергия этого камня в точности равна массе камня, помноженной на высоту горы и на ускорение силы тяжести. Но от того, что мы знаем об этом, в камне ничего не меняется. Он продолжает покоиться и может пролежать на горе до скончания времен. Иное дело, если он упадет. Свалившись с горы, камень может натворить много бед, например разбить ту же самую бутылку. Но здесь будет участвовать уже не потенциальная, а кинетическая энергия камня, которой он обладает в момент соприкосновения с бутылкой.

Слов нет, не всегда все обстоит просто. Например, качающийся маятник. Находясь в самом нижнем положении, маятник движется с максимальной скоростью, и вся его энергия суть энергия кинетическая. А находясь в крайнем верхнем положении, маятник на мгновение останавливается — это видно простым глазом — и при этом явно обладает энергией, иначе откуда потом берется его скорость?

Проблема эта весьма глубока и до сих пор не решена полностью. Поэтому ограничимся здесь тем, что наметим контуры одного из возможных ответов на поставленный вопрос. Не скроем этого, он удовлетворил бы нас в наибольшей мере. Пусть имеется все та же бутылка с порохом, на сей раз крепко заткнутая пробкой, и пусть в некоторый момент вы подожгли порох каким-нибудь не оказывающим на бутылку влияния способом, например с помощью солнечных лучей, которые сфокусировали увеличительным стеклом. По мере сгорания пороха давление внутри бутылки увеличивается. Вопрос первый: почему стенки бутылки не выпускают продукты сгорания, если, как мы установили, никаких стенок на самом деле не существует, а существуют лишь атомные ядра, расположенные друг от друга на гигантских по сравнению с их собственными размерами расстояниях?

Молекулы горячих газов взаимодействуют не с самими молекулами стенок бутылок, а с чем-то, что находится в промежутках между молекулами. Что же такое там может находиться? Молекулы стенок бутылки взаимодействуют между собой, иначе говоря, они обмениваются энергией. Но мы уже говорили, что энергия может излучаться и поглощаться лишь порциями — квантами. В твердом теле такие кванты энергии получили название фононов. Промежуток между молекулами сте-

нок бутылки заполнен большим количеством фононов.

На первый вопрос можно найти вполне удовлетворительный ответ, если предположить, что эти-то частицы и осуществляют передачу энергии между любой парой молекул, независимо от того, принадлежат они обе стенке или одна — стенке, вторая — газу. Если молекула принадлежит газу, она не может пройти сквозь стенку, поскольку этому мешают столкновения с множеством фононов. Что здесь самое замечательное? Нет нужды рассматривать отдельные акты взаимодействия. Все происходящее в нашей системе исчерпывающим образом описывается, если исходить из утверждения, что сумма количеств движения всех молекул и всех фононов либо равна нулю, либо равна количеству движения центра масс системы.

Подобные представления позволяют ответить на второй важный вопрос: почему в некоторый момент времени вылетает пробка или лопается бутылка и система, ранее представлявшаяся нам как целое, разлетается на множество частей? Происходит так потому, что имеются некоторые ограничения, накладываемые на энергию фононов. Поскольку и молекулы, и фононы обладают лишь кинетической энергией (в отсутствие поля отсутствует и потенциальная энергия), мы можем, во всяком случае на данном уровне рассмотрения, обойтись без привлечения понятия потенциальной энергии.

Волчки и гироскопы

Действие закона сохранения момента количества движения наблюдал каждый ребенок, который хоть раз в жизни запускал волчок. Момент количества движения относительно данной точки — это произведение массы на скорость, с которой перемещается данная масса, на расстояние от центра масс до этой самой точки. Момент количества движения — вектор, в каждый момент времени направленный перпендикулярно к плоскости, в которой происходит движение. Так же, как количество движения, момент количества движения — величина аддитивная. Момент количества движения сложной системы относительно данной точки равен сумме моментов количества движения отдельных частей относительно той же точки. Последнее свойство, в частности, приводит к тому, что отличным от нуля моментом количества

движения обладает физическая система, вращающаяся как единое целое вокруг некоторой оси. При этом направление момента количества движения совпадает с направлением оси вращения.

Закон сохранения момента количества движения утверждает, что момент количества движения любого тела или системы тел остается неизменным, если отсутствует взаимодействие этой системы с другими телами. При взаимодействии нескольких систем суммарный момент количества движения всех систем также остается неизменным. Из неизменности момента количества движения следует неизменность его направления. Проще говоря, всякое вращающееся тело сохраняет направление оси своего вращения. Поэтому волчки не падают на пол. Поэтому не падают на бокдвигающиеся велосипеды и мотоциклы — их колеса сохраняют направление оси вращения. Именно поэтому Земля сохраняет направление оси своего вращения, от неизменности наклона земной оси и происходит регулярная смена времен года.

Одно из следствий закона сохранения количества движения — свойство тел сохранять состояние равномерного прямолинейного движения. Ускорение их, т. е. изменение количества движения, возможно только при наличии взаимодействия, которое часто называют силой. Этой силе ставят в соответствие равную ей по величине и противоположную по направлению силу инерции, пропорциональную произведению массы на ускорение. Вопрос о силах мы уже достаточно подробно обсудили и повторяем слово «сила» для того, чтобы сказать: с законом сохранения момента количества движения также связывают существование некоторой силы инерции.

Если угловая скорость вращения остается постоянной, а изменяется направление оси вращения (т. е. направление вектора момента количества движения), говорят о наличии специального вида ускорения, называемого ускорением Кориолиса. С кориолисовым ускорением связывают силу инерции, равную произведению момента инерции на кориолисово ускорение. Считается, что именно эта сила «сопротивляется» изменению направления оси вращения. Как и в случаях линейных перемещений, при расчете положения вращающихся тел можно обойтись без введения кориолисовых сил и все необходимые выкладки производить, основываясь на законе сохранения момента количества движения.

Стремление вращающихся тел сохранять направление оси вращения используется в конструкциях гироскопов — приборов, предназначенных для удержания заданных направлений. Гироскопы весьма широко распространены. Основная область их применения — ориентация в пространстве движущихся объектов.

Коль уж мы говорили о ракетах, имеет смысл указать, что заставить ракету лететь в заданном направлении, не обращаясь при этом к помощи внешних ориентиров (земных предметов или звезд), можно лишь с помощью гироскопа. Таким образом, современная ракета — это устройство, принцип действия которого основан на использовании закона сохранения количества движения и закона сохранения момента количества движения.

Куда направлен мир

Вращающееся тело сохраняет направление оси своего вращения. А что такое, собственно, направление? Понятие направления связано с понятием системы координат. В качестве системы координат обычно выбирают три прямые линии, три оси, взаимно перпендикулярные друг другу. Если оси выбраны, то положение предмета задают тремя числами — координатами, представляющими собой результаты измерения расстояния до каждой из осей, а направление некоторой прямой (в том числе и оси вращения) задается тремя углами, которые эта прямая составляет с каждой из осей.

В комнате осями координат можно считать линии пересечения двух смежных стенок и пола, а третья ось, направленная вертикально вверх, — линия пересечения этих стенок. Такая система отсчета неподвижна относительно Земли, но движется, причем ускоренно, вместе с Землей относительно Солнца и других звезд нашей Галактики. В тех случаях когда это движение существенно, выбирают систему отсчета, также состоящую из трех осей, направленных к каким-либо трем «неподвижным» звездам.

Принцип относительности Галилея утверждает, что абсолютной скорости не существует. Можно говорить о скорости движения относительно конкретной системы отсчета. А если наша система отсчета в свою очередь движется относительно другой системы отсчета? Ско-

рость в этой другой системе равна сумме скорости тела в нашей системе отсчета и скорости, с которой наша система движется относительно другой системы отсчета. В специальной теории относительности утверждается, по существу, то же самое, усложняется лишь процедура сложения скоростей

А как быть с ускорением? Рассмотрим несколько систем отсчета, движущихся друг относительно друга прямолинейно и равномерно. Такие системы отсчета называют инерциальными. Ускорение тела, если таковое имеется, будет одинаковым по отношению ко всем инерциальным системам отсчета. В этом смысле ускорение вроде бы абсолютно.

Все сказанное справедливо по отношению к линейным скоростям и ускорениям. Что же можно сказать о вращении? Скорость вращательного движения относительная или абсолютная? С одной стороны, вроде бы относительная. Например, если представить себе вращающуюся комнату, то все расположенные в ней предметы также вращаются, но относительно комнаты остаются неподвижными. Вспомним интересный мысленный опыт, который впервые рассматривал еще Ньютон. На веревке висит ведро с водой. Закрутили веревку и дали ей возможность свободно раскручиваться. Веревка заставляет вращаться ведро, а вращение ведра постепенно передается воде. Тот факт, что ведро вращается, можно определить по форме водной поверхности: у неподвижного ведра водяная поверхность плоская, а у вращающегося — вода поднимается по краям и поверхность принимает форму параболоида вращения.

Степень изогнутости поверхности воды зависит от скорости вращения ведра. Абсолютна эта скорость вращения или относительна? Если относительна — значит должна существовать система отсчета, относительно которой определяется скорость. Пусть такой системой отсчета служит система с тремя осями, направленными к трем «неподвижным» звездам. Спрашивается: если оставить ведро неподвижным, а начать вращать вокруг него звезды, искривится поверхность воды или нет?

На этот вопрос современная наука пока не дает ответа. Большинство опытных данных, казалось бы, свидетельствует в пользу отрицательного ответа. Но из этого отнюдь не следует, что сам вопрос снят с повестки дня. Наоборот, это один из тех вопросов, ответы на которые,

по всей вероятности, составят костяк будущей физики.

Давайте немножко пофантазируем и мы. Предположим, что поведение ведра с водой никак не зависит от поведения остальной материи Вселенной. Если так, то можно мысленно удалить всю остальную материю и считать, что законы вращения, в частности, закон сохранения момента количества движения, останутся неизменными. Поверхность воды во вращающемся ведре по-прежнему будет искривляться, а направление оси вращения сохранится. Но что значит направление в абсолютно пустом пространстве, где нет ничего, кроме вращающегося ведра? Вопрос этот далеко не праздный. Нельзя вообще говорить о направлении, если отсутствует что бы то ни было, кроме поверхности воды в том же ведре, с чем можно это направление сравнить. Не имея никаких ориентиров, как узнать, что ведро вращается?

Попробуем облегчить задачу. Предположим, в абсолютно пустом пространстве, из которого удалена вся материя, вы разместили три вращающихся гироскопа и объявили оси их вращения системой отсчета. Останутся ли эти направления неизменными во веки веков? Ведь тогда нашу систему следует признать абсолютной системой отсчета. А может быть, наличие одного из трех гироскопов как-то повлияет на направление осей вращений двух остальных?

И снова на эти вопросы пока нет ответов. Но задумываться над ними приходится. Теоретически установлено, что массы материи искривляют пространство. Это подтверждают эксперименты. Было обнаружено, что световой луч, проходя вблизи Солнца, искривляет свою траекторию. А если по пути такого луча пронести вращающийся гироскоп, изменится ли направление оси его вращения? Такого опыта еще никто не ставил, но есть все основания полагать, что изменится. И вообще, как можно определять направления в криволинейном пространстве?

Чтобы уж до конца запутать картину, поговорим еще вот о чем. Полагают, что для тел, движущихся со скоростями, близкими к скорости света, сокращается расстояние и замедляется течение времени. Эти утверждения обладают на сегодня достаточно убедительной суммой экспериментальных подтверждений. Но у нас было много случаев убедиться, что абсолютно твердое те-

ло, движущееся с некоторой скоростью, всего лишь мысленная конструкция. На самом деле каждое тело представляет собой множество частиц. Мы останавливались на молекулах, но молекулы, в свою очередь, состоят из атомов, атомы — из протонов, нейтронов и электронов, протоны и нейтроны — из кварков, и что там дальше, еще не известно.

Так или иначе, нет движущихся тел, а есть множества частиц, участвующих в общем движении, которое и принимают за движение тела. Кроме того, частицы движутся каждая сама по себе, причем, как показал пример с автомобилем, скорости отдельных частиц могут во много раз превышать скорость движения центра масс. Для каждой частицы, составляющей тело, существует свое время и свое расстояние. Причем и время и расстояние различны у различных частиц. Как в таком случае следует определять центр масс? Снова вопрос, ответить на который наука пока не в состоянии.

Интересно, что все наши вопросы, список которых при желании можно сколь угодно продолжить, известны с глубокой древности и до сих пор служат предметом научного спора. Конца этому спору не видно. Сюда же относится и спор о том, чем заполнено пространство. Одно время властвовала теория эфира. Развенчанная новейшими исследованиями, и в первую очередь знаменитым опытом Майкельсона—Морли, теория эфира уступила место всевозможным полям. Но в отличие, скажем, от теории теплорода, с которой было покончено раз и навсегда, теория эфира категорически не хочет уступать своих позиций. К ней в начале нашего века возвращался Генрих Герц, к ней возвращаются некоторые современные ученые. В общем-то, понятно, почему. К чему привели исследования полей? К выводу о том, что если поле действительно существует, то оно должно быть материально, обладать всеми атрибутами материи и, конечно, массой.

Но если так, то чего, спрашивается, достигли, отменив эфир и заменив его полем? Только того, что эфир предполагался распределенным в пространстве равномерно, а интенсивность полей увеличивается по мере приближения к их источникам. Но и это не факт. Мы не знаем всех источников, а следовательно, не знаем и всех полей.

Современная квантовая электродинамика вместо по-

нения поля ввела особого рода частицы — кванты, которыми заполнено пространство. Надо сказать прямо, что кванты — очень привлекательные частицы. Они отвечают всем опытным данным о дискретном характере взаимодействий. Кроме того, они позволяют ответить на многие вопросы, иначе остающиеся без ответов. Например, такой вопрос: почему интенсивность гравитационных и электромагнитных взаимодействий убывает с квадратом расстояния между взаимодействующими объектами?

То, что это на самом деле так, подтверждено бесчисленным множеством опытов и не вызывает сомнения. Многочисленные теории, основывающиеся на этом экспериментальном факте, объясняют многое и прекрасно согласуются с другими опытными данными. Но почему все-таки квадрат расстояния? Неужели все дело в том, что господь бог предпочитает параболу всем другим кривым?

Предположение о наличии квантов дает на этот вопрос прямой ответ. Представьте себе объект, из которого во все стороны равномерно испускаются крохотные частицы — кванты. Равномерно во все стороны. Если окружить такой объект мысленной сферой, то количество квантов, приходящихся в среднем в единицу времени на единицу площади поверхности этой сферы, убывает с квадратом радиуса этой сферы, т.е. с квадратом расстояния.

Ну что ж, заполняем пространство квантами. Но ведь кванты — это тот же эфир, правда, какой-то зернистый. Список заполнителей можно было бы продолжить, включив в него и море Дирака, состоящее из еще не родившихся пар электронов и позитронов. Остается вопрос, который мы поставили в заголовке главы, но так на него и не ответили. Если считать, что объект, обладающий массой, постоянно испускает гравитоны, то почему запас гравитонов никогда не иссякает? Мы не уходим от ответа на него, но подождем еще некоторое время, пока у нас появится больше данных.

Почему пространство обязательно нужно чем-нибудь заполнять? Откуда появляется уверенность, что существует нечто, требующее заполнения? Вера в то, что существует некоторое неизменное, абсолютно пустое пространство, которое там и здесь по-разному заполняется различными телами и субстанциями, зарождается в нас с первых дней жизни и неуклонно крепнет по мере при-

обретения опыта. Вспомните свое детство. О существовании воздуха вы узнали не сразу. Чтобы заставить вас поверить в шарообразную форму Земли и принять ее как данность, потребовалось достаточно много усилий. А пространство вокруг себя вы восприняли сразу. Именно пустое пространство, которое все больше и больше заполняется по мере приобретения опыта и знаний.

Но мы уже привыкли, что вещи, представляющиеся наиболее очевидными, часто меньше всего отвечают реальности. Не произойдет ли и с пространством нечто подобное? Ведь вера в абсолютность пространства, т. е. в то, что его свойства, например результаты измерения длины, не зависят от происходящих в нем процессов, бесповоротно поколеблена данными общей теории относительности, от которых сейчас нельзя отмахнуться хотя бы из-за огромного количества экспериментальных подтверждений. Пространство может расширяться и сокращаться, оно может искривляться и выпрямляться. Отсюда один шаг до вопроса: существует ли абсолютное пространство, которое можно заполнять или не заполнять различными субстанциями, в том числе и эфиром?

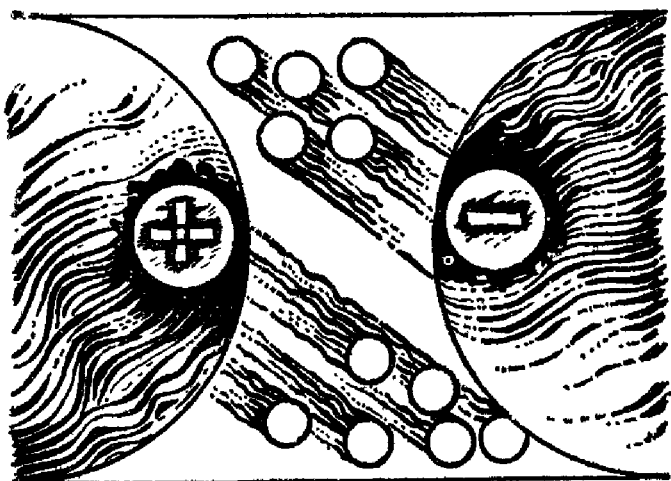
Согласитесь, однако, если стать на такую точку зрения, что абсолютного пространства не существует, что пространство есть один из атрибутов материи, таких, как масса или количество движения, что если изъять из пространства материю, то исчезнет и само пространство, так сразу сами собой отпадут все вопросы. Пространство не надо будет заполнять эфиром — оно само есть материя.

Ответов на все эти вопросы пока нет. Но обсуждать их можно и нужно. А пока подведем итоги.

Движением макроскопических тел считают такое движение множества частиц, составляющих эти тела, в котором установлен некоторый порядок и, в частности, не равны нулю сумма количеств движения и суммарный момент количества движения. Соответственно механическая энергия — это энергия частично упорядоченного движения. Преобразование тепловой энергии в механическую сопровождается частичным упорядочением, за которое надо платить. Плата выражается в том, что в подобных преобразованиях часть преобразуемой тепловой энергии остается тепловой и коэффициент полезного действия всегда меньше единицы.

ГЛАВА 3

Электричество



У истоков

Эту главу можно было бы начать с того, как некто Фаллес из греческого города Милета, славившийся своей рассеянностью, без малого две с половиной тысячи лет назад увидел то, на что другие не обращали внимания. Фаллес заметил, что янтарь, потертый о ткань, приобретает новое свойство — притягивает к себе мелкие предметы. От греческого слова «электрон» — янтарь — подобные явления получили название электрических. А можно было бы начать с того, как датчанин Г.-Х. Эрстед (1777—1851) обратил внимание на то, что намагниченная стрелка обычного компаса показывает совсем не туда, куда ей положено указывать, если где-то поблизости оказывается проводник с протекающим по нему током.

Наконец, совсем правильно было бы начать с анекдота о том, как великий Фарадей, долго таскавший в кармане катушку с проволокой и постоянный магнит, как-то «случайно» догадался подвигать магнит внутри катушки и, по его собственным словам, превратил магнетизм в электричество. Фарадей не только осуществил взаимные преобразования электрического и магнитного полей, он первым среди своих современников и пред-

шественников сделал попытку объяснить эти преобразования.

Пространство заполнено не имеющими толщины упругими нитями, считал Фарадей. Если в такое пространство попадает электрический заряд, нити искривляются, натягиваются и передают действие заряда другим заряженным телам. Пользуясь такими нитями или, как он их назвал, силовыми линиями, Фарадей не только дал качественное объяснение такому явлению, как электромагнитная индукция, но и провел первые количественные расчеты магнитного поля. А физики знают, что даже сегодня при наличии мощных ЭВМ расчет сложного электрического поля — задача далеко не простая.

Электрон

Первооснову всех электрических явлений создают электрические заряды, которые, как известно, бывают двух знаков: положительные и отрицательные. Носителями элементарного (т. е. наименьшего из всех возможных) отрицательного электрического заряда являются электроны, а носителями элементарного положительного электрического заряда — протоны. Существует еще довольно много частиц, несущих элементарные положительные и отрицательные электрические заряды. Например, позитрон, который во всем подобен электрону, кроме знака заряда. Но эти частицы живут очень недолго и потому не принимают заметного участия в интересующих нас явлениях. Что же касается электрона и протона, и тот и другой практически вечны. Никто пока не наблюдал разрушившегося электрона, а о времени жизни протона все еще спорят ученые, но сходятся в том, что это время, выраженное в годах, изображается единицей с большим количеством нулей.

Так незаметно для себя мы пришли к еще одному закону сохранения — закону сохранения электрического заряда.

Любое физическое тело из тех, что окружают нас, или из тех, которых мы никогда не видели, но существование которых предполагаем, состоит в конечном итоге из электронов, протонов и нейтронов. Как правило, количество протонов в теле равно количеству электронов и поэтому тело остается электрически нейтральным. Наличие в нем электрических зарядов не сказывается уже

на расстоянии порядка микрон от его поверхности. Если же количество электронов не равно количеству протонов, тело приобретает свойства электрически заряженного объекта. Так и происходило в опытах Фаллеса, когда при натирании янтаря о матерную часть электронов переходила с янтаря на ткань.

Два электрически заряженных тела притягиваются друг к другу, если их заряды разноименны, и отталкиваются друг от друга, если их заряды одноименны, с силой, прямо пропорциональной произведению зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между зарядами. Обычно эти силы имеют вполне добротную «комнатную» величину несколько десятых или сотых долей ньютона. Два тела, несущие на себе заряды 1 Кул и разнесенные друг от друга на расстояние 1 м, взаимодействуют с силой 1 Н. Один кулон — огромная величина заряда, и получить такой заряд в лабораторных условиях, скажем, на шарике диаметром 1 см — задача достаточно сложная.

Небезынтересно произвести здесь такой расчет. Металлический шарик диаметром 1 см содержит примерно 10^{25} электронов — мы берем очень приблизительную цифру, потому что, естественно, количество электронов зависит прежде всего от металла, из которого сделан шарик. Заряд электрона составляет $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кул. Следовательно, чтобы получить заряд 1 Кул, шарик должен потерять или приобрести дополнительно примерно лишь одну миллионную от полного запаса своих электронов. Если бы по какой-то причине шарик потерял все свои электроны, он приобрел бы положительный заряд 1 млн. Кул. Два таких шарика, разнесенных на гигантское по сравнению с атомными размерами расстояние 1 м, взаимодействовали бы с силой 10^{12} Н, или около 100 млн. т.

Сто миллионов тонн! Представьте себе небоскреб, парящий в воздухе на высоте 1 м над землей, а удерживает его от падения сила отталкивания от крохотного шарика. Только осознав эти цифры, можно хоть немножко оценить, какие гигантские силы действуют в так называемом микромире. Ведь источником зарядов там остаются все те же электроны и протоны.

Электрические заряды, будь то заряды отдельных электронов или заряды шариков, взаимодействуют на расстоянии. Это дает основание считать, что пространство вокруг электрических зарядов заполнено электрическим (говорят также, электростатическим) полем или, иначе, любая точка пространства, окружающего заряд, обладает тем свойством, что если поместить в ней пробный единичный положительный электрический заряд, то на него будет действовать сила, равная по величине и направлению напряженности электрического поля в данной точке.

Хочешь не хочешь, придется повторить тот же вопрос, который мы задавали в предыдущей главе. Что же, собственно, первично: заряд или поле? По этому поводу продолжаются споры. Многим вопрос кажется чисто риторическим, вроде того, что первым появилось на свет — курица или яйцо? Действительно, можно спросить и так: нужно ли считать, что электрический заряд порождает вокруг себя поле или, наоборот, только поле представляет собой объективную реальность, а заряд есть одна из численных характеристик поля, такая же, как напряженность или потенциал.

Что можно сказать по этому поводу? С одной стороны, электрическое поле представляет собой единственное проявление заряда. Если бы не было поля (точнее, сил взаимодействия), мы никогда не узнали бы о существовании электрических зарядов. С другой стороны, неизменность электрических зарядов не может не заставить относиться к ним достаточно серьезно.

Нельзя сбросить со счетов и следующий факт. На сегодня установлено окончательно не только теоретически, но и экспериментально: сила взаимодействия распространяется в пространстве не мгновенно, а с конечной скоростью, равной скорости света. Что означает это применительно к нашим рассуждениям?

Пусть имеется заряд, создающий поле, и в некоторой точке поля расположен пробный заряд, испытывающий на себе его силу. Предположим теперь, что заряд, порождающий поле, по какой-то причине либо изменяет свою величину, либо просто перемещается на некоторое расстояние. Пробный заряд «узнает» об этих изменениях лишь через промежуток времени, равный расстоянию,

разделяющему основной и пробный заряды, поделенному на скорость света. В течение всего этого промежутка сила, действующая на пробный заряд, остается неизменной. Поскольку основной заряд изменился (теоретически он может вовсе исчезнуть), нам не остается ничего другого, как заключить, что действие на пробный заряд оказывает именно поле.

Все это далеко не умозрительные рассуждения. Современная лазерная техника позволяет передать на расстояние сгусток электромагнитного поля, мощность которого равна мощности ядерного взрыва. Этот сгусток способен произвести колоссальные разрушения, и они будут происходить тогда, когда лазер перестал действовать, а следовательно, причина, породившая электромагнитное поле, отсутствует.

Независимо от продолжающихся споров под давлением неумолимых фактов необходимо признать, что электрическое (скоро мы начнем говорить электромагнитное) поле способно существовать хотя бы в течение малых промежутков времени независимо от своего источника, сохраняя все свои свойства. К слову сказать, современная экспериментальная техника позволяет наблюдать отдельные движущиеся в пространстве отрезки светового луча, которые опять-таки есть не что иное, как сгустки электромагнитного поля.

Пробный заряд, внесенный в поле, способен перемещаться под влиянием действующей на него силы и при этом совершать работу. Поскольку та же самая работа не могла бы совершаться в отсутствие поля (у пробного заряда не было бы причины двигаться), не остается ничего другого, как признать, что электромагнитное поле обладает определенным запасом распределенной в нем энергии. Только что сделанный вывод имеет для нас определяющее значение. У энергии всегда имеется некоторый конкретный носитель. В случаях тепловой и механической энергии такими носителями были молекулы, движущиеся беспорядочно или с частичным порядком и несущие на себе каждая порцию кинетической энергии, численно равную полупроизведению массы на квадрат скорости.

Если признать все проведенные рассуждения справедливыми, а похоже, что ничего другого не остается, то окажется, что мы столкнулись с некоторым новым видом энергии, распределенным в пространстве. При этом сра-

зу многое становится неясным. Вся ли электрическая энергия распределена в поле или она как-то делится между полем и заряженными частицами? Электрическая энергия, распределенная в поле, и энергия, связанная с зарядами, представляют собой одно и то же или это различные физические сущности? Возможны ли взаимные преобразования между различными видами энергии, и если да, то по каким законам они совершаются? Все это вопросы отнюдь не простые, и мы попытаемся до конца этой главы дать на них хотя бы частичные ответы.

Как построить поле?

В предыдущей главе мы, казалось бы, полностью разделились с силой, а в этой главе, похоже, снова вернулись к этому понятию и пользуемся им для определения характеристик электромагнитного поля. Еще раз повторяем: мы не имеем ничего против понятия силы. Очень часто оно оказывается весьма плодотворным. Понятием силы пользуются авторы самых современных учебников физики. Но важно отдавать себе отчет и в другом. Существует наука описательная (говорят, феноменологическая) и существует наука фундаментальная, ставящая себе цель не столько описать те или иные явления, сколько вскрыть их взаимосвязи, понять причины и следствия. Обе части составляют вместе единое целое и не мыслимы одна без другой. Понятие силы удобно при феноменологических описаниях, хотя бы потому, что оно позволяет относительно легко перекинуть мостик от описываемого явления к нашим ощущениям. Но понятие силы совершенно непригодно, когда следует выявить взаимосвязь явлений, поскольку, поверив в физическую сущность, которая может произвольно исчезать и появляться, теряешь основу для логических рассуждений. Остается лишь повторять: мир таков, потому что он таков.

Представьте себе два электрических заряда, разнесенных на очень большое расстояние друг от друга. Если заряды одноименные, они взаимно отталкиваются и сблизить их можно, лишь преодолевая это отталкивание. Если все-таки их сблизить, а потом отпустить, заряды вновь разойдутся на весьма большое (теоретически бесконечное) расстояние. При этом будет проделана определенная работа. Что это значит? Система, состоящая из двух

зарядов, находящихся на заданном расстоянии друг от друга, обладает энергией, численно равной работе, которая обязательно совершится, если заряды предоставить самим себе. Можно даже сказать, во что превратится эта работа. Разлетаясь в разные стороны, заряды приобретут скорости, а следовательно, и кинетическую энергию.

Итак, если предоставить самим себе два электрических заряда, находящихся на заданном расстоянии друг от друга, то в конечном итоге они приобретут кинетическую энергию. Энергия системы из двух зарядов и равна этой суммарной кинетической энергии. Где хранится эта энергия? Поскольку с самими зарядами как при сближении их, так и при их самопроизвольном разлете ничего не происходит, ясно, что энергия хранится в поле, образованном двумя одноименными зарядами, находящимися на определенном расстоянии друг от друга.

Как же энергию подсчитать иначе? Зная, что взаимодействие зарядов пропорционально произведению их величин и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними, можно вычислить, что энергия системы из двух зарядов равна произведению их величин, деленному на расстояние между ними. В случае разноименных зарядов все точно так же, только на удаление зарядов на бесконечно большое расстояние друг от друга нужно затратить определенную работу. По этой причине энергии двух разноименных зарядов, находящихся на данном расстоянии друг от друга, присваивают знак минус.

Пойдем дальше. Добавим к системе из двух зарядов, первого и второго, находящихся друг от друга на некотором расстоянии, третий заряд. Электрические поля обладают очень важным свойством, получившим название свойства суперпозиции. В чем оно состоит? Третий заряд взаимодействует с первым так, как будто второго не существует, а со вторым так, как будто не существует первого. Это значит, энергия системы из трех зарядов равна произведению величин первого и второго зарядов, поделенному на расстояние между первым и вторым зарядами (будто третьего не существует), плюс произведение величин первого и третьего зарядов, поделенное на расстояние между первым и третьим зарядом (будто второго не существует) плюс произведение величин второго и третьего зарядов, поделенное на расстояние между вторым и третьим зарядом (будто первого не существует).

вует). Уверенно суммируем полученные значения, потому что знаем: энергия всегда аддитивна. Знаем мы и то, что с зарядом никогда ничего не случается и поэтому, например, величина первого заряда останется неизменной независимо от того, с каким количеством других зарядов он взаимодействует.

Теперь без всяких колебаний можем утверждать, что энергия системы, состоящей из любого числа зарядов, произвольным образом расположенных в пространстве, равна сумме энергий попарных взаимодействий этих зарядов. При составлении такой суммы, естественно, следует учитывать знаки слагаемых. Для каждой пары одноименных зарядов энергия берется со знаком плюс, а для каждой пары разноименных зарядов — со знаком минус. Итак, электрическое поле произвольного числа произвольно расположенных зарядов содержит в себе энергию. Пока мы установили, что если заряды неподвижны, эта энергия равна той работе, которую потребовалось затратить, чтобы разместить заряды по своим местам.

Мы освежили в памяти хотя и известный из курса средней школы, но довольно-таки сухой материал. Чтобы немножко развеяться, предлагаем поработать физически. Но чтобы для такой работы был повод, сначала ответьте на вопрос. Вот построили вы систему зарядов, посчитав при этом работу, а потом дали возможность зарядам разбежаться в разные стороны. Заряды (считаем для простоты одноименные) разбегутся на очень далекие друг от друга расстояния и при этом вся затраченная вами работа превратится в кинетическую энергию движущихся зарядов. Так что же, теперь энергия (кроме уже упомянутой кинетической) разбежавшейся системы равна нулю?

С одной стороны, вроде бы да, ведь работа, которую в свое время затратили на стаскивание зарядов в систему, полностью перешла в кинетическую энергию, а дальше зарядам разбегаться, кажется, некуда — они и так на бесконечных расстояниях друг от друга. С другой стороны, каждый заряд окружен электрическим полем. Так что, это какое-нибудь другое поле?

Конечно, нет. Чтобы убедиться в этом на собственном опыте, постройте сами электрический заряд. Пусть где-то очень далеко имеется склад электрических зарядов. Запаситесь терпением и начните таскать их оттуда малень-

кими порциями в заданное место, ну, например, в комнату, где вы находитесь.

Первую порцию вы принесете беспрепятственно, ведь в комнате нет никаких других зарядов и вашей порции не с чем взаимодействовать. Начиная со второй порции, задача усложняется. Чтобы принести ее, надо преодолеть взаимное отталкивание уже принесенной и вновь подносимой порции. Поместить их в одно и то же место также нельзя — мы установили, что если расстояние между зарядами равно нулю, то на создание такой системы нужно затратить бесконечно большую работу. Складывайте порции зарядов на некоторых расстояниях друг от друга в пределах сферы данного радиуса. Принесли вторую порцию, пошли за третьей. Ясно, что третью порцию нести труднее, чем вторую, потому что противодействует теперь заряд, состоящий из двух порций. Четвертую порцию соответственно нести еще труднее, чем третью, и т. д. Но не отчаивайтесь. Чем тяжелее труд, тем приятнее потом отдых. А отдых наступит, когда вы создадите заряд конечной величины Q .

Когда заряд наконец создан, вы можете сесть и подсчитать всю проделанную работу. Если работу, затраченную на перенос первой порции, принять за единицу, то на перенос второй порции будут затрачены две такие единицы, на перенос третьей — три и т. д. Не забывайте еще одно обстоятельство: по мере заполнения сферы вы размещаете порции, вообще говоря, на неодинаковых расстояниях друг от друга. В результате на построение заряда величиной Q вы затратили $3/5 \frac{Q^2}{R}$ единиц работы, где R — радиус заполненной зарядами сферы. Именно такой будет энергия электрического поля одиночного заряда.

Начинаются трудности

Рассмотрим факт, который представляет собой на сегодня, пожалуй, единственное уязвимое место в кажущемся безупречным здании квантовой электроники. Вот перед вами электрон. Он имеет отрицательный элементарный электрический заряд и, следовательно, окружен электрическим полем. В поле сосредоточена энергия, и довольно просто подсчитать, что плотность энергии в каждой точке пропорциональна квадрату напря-

женности поля в этой точке. Напряженность поля, со своей стороны, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра электрона до данной точки.

Зная все это, вы можете без всяких трудов вычислить полное количество энергии, содержащейся в пространстве, окружающем электрон. Если предположить, что электрический заряд равномерно распределен по поверхности электрона, то это количество равно $\frac{q_e^2}{2 \cdot \frac{4}{3} \pi r_e}$.

А если считать, что электрический заряд равномерно распределен по всему объему электрона, то полное ко-

личество энергии равно $\frac{3}{5} \frac{q_e^2}{r_e}$, где q_e — заряд электрона;

r_e — радиус электрона, иначе говоря, радиус некой шаровой поверхности, отделяющей то, что мы собираемся называть электроном, от того, что мы по тем или иным соображениям электроном не считаем. Оговоримся сразу: мы присвоили электрону шарообразную форму без малейших на то оснований. Но если даже это не так, если электрон больше похож на кубик или кольцо, то изменятся лишь коэффициенты, а полное количество энергии, распределенной в пространстве вокруг электрона, останется пропорциональным квадрату заряда, поделенному на некую величину, которую можно понимать как размер электрона.

Если имеется какое-то количество энергии, то, согласно знаменитой формуле Эйнштейна, которая сегодня не вызывает ни малейших сомнений, это количество энергии обладает массой. В частности, масса электрического поля, окружающего электрон, или, если вам по какой-либо причине не хочется произносить слово «поле», то масса, распределенная в пространстве, окружающем электрон, равна

$$a \frac{q_e^2}{r_e c^2},$$

где c — скорость света; a — некоторый коэффициент (обычно $\frac{2}{3}$ или $\frac{3}{5}$), зависящий от того, какой вы представляете себе форму электрона и как вы представляете себе распределение заряда внутри электрона. И вот теперь внимательно посмотрите на формулу

$$m = a \frac{q_e^2}{r_e c^2}.$$

Во-первых, какими бы вы ни выбрали величины a и r_e , электромагнитное поле всегда обладает массой. Сам электрон тоже обладает массой, что подтверждено огромным количеством опытов. Какая же часть массы электрона принадлежит собственно электрону, а какая часть — окружающему его полю? Ответ на этот вопрос зависит от того, какой мы представляем себе величину r_e . Если r_e относительно велико, можно считать, что большая часть (но не вся) массы электрона принадлежит собственно электрону, а меньшая ее часть — полю. Полагая форму электрона шарообразной с радиусом, равным примерно $1,7 \cdot 10^{-13}$ см, мы приходим к интересному выводу. Сам по себе электрон вообще не обладает массой, а вся его масса, кстати сказать, равная $9,1 \cdot 10^{-28}$ г, полностью распределена в окружающем пространстве. Конечно, вам не терпится задать вопрос: что же такое тогда электрон? Не станем, однако, торопиться — самое интересное нас ждет впереди.

Предположим, что электрон — шар, а радиус этого шара меньше, чем $1,7 \cdot 10^{-13}$ см. Тогда масса электрического поля оказывается больше массы электрона. Если радиус электрона равен нулю, то масса электрона оказывается равной бесконечности. Бессмыслица? Не торопитесь с выводами. В том-то и дело, что об этом можно было бы и не говорить, если бы не одно «чрезвычайно досадное» обстоятельство. Большинство имеющихся на сегодня теоретических положений и опытных данных свидетельствует как раз о том, что электрон не имеет размеров — его радиус равен нулю. Известный физик, лауреат Нобелевской премии Ричард Фейнман писал по этому поводу:

«Мы вынуждены прийти к заключению, что представление, будто энергия сосредоточена в поле, не согласуется с предположением о существовании точечных зарядов. Один путь преодоления этой трудности — это говорить, что элементарные заряды (такие, как электрон) на самом деле вовсе не точки, а небольшие зарядовые распределения. Но можно говорить и обратное: неправильность коренится в нашей теории электричества на очень малых расстояниях или в нашем представлении о сохранении энергии в каждом месте порознь. Но каждая

такая точка зрения все равно встречается с затруднениями. И их никогда еще не удавалось преодолеть; существуют они и по сей день».

Такова первая, но далеко не последняя трудность на нашем пути. К этому добавим еще кое-что. Когда вы строили систему из одноименных зарядов, они, будучи предоставленными самим себе, тут же разлетались. А вот электрон не разлетается. Никому никогда не приходилось наблюдать половинку или четвертушку электрона. Спрашивается, что удерживает заряд электрона от распада на части? Если «внутри» у электрона какой-то твердый шарик, то как увязать это с предположением о точечных размерах? Ведь тогда получится бесконечно большая плотность материи.

Ну а что говорят об этом эксперименты? Опыты по взаимодействию протонов с электронами показали, что при расстояниях между ними, больших 10^{-13} см, эти частицы ведут себя как точечные электрические заряды и подчиняются закону Кулона. А при меньших расстояниях все обстоит не так. При расстоянии порядка 10^{-14} см взаимодействие ослабевает в 10 раз. Значит, либо электрон, либо протон — не точка, а заряд, распределенный в конечном объеме. Ученые склонны полагать, что таким свойством обладает именно протон. Кстати, из этих же опытов можно сделать и другой вывод: электрон проникает внутрь протона. Ставились и такие опыты, когда протоны пронизывались другими частицами насквозь. Вывод однозначный: никакого твердого, монолитного вещества в природе не существует.

Но все же, что такое электрон? Конечно, заманчиво предположить: то, что мы считаем электроном, только мысленная точка, центр масс. Сама масса электрона, она же энергия, распределена в электрическом поле, окружающем эту точку. Но такое предположение не вяжется с другими известными свойствами, например с наличием у электрона момента количества движения — спина. Обо всем этом мы еще поговорим, а пока дадим возможность читателю немножко пофантазировать.

Электрический ток

Наверное, не стоит излагать здесь содержание учебника физики, поэтому ограничимся короткой справкой. Электрическим током называется движение электричес-

ких зарядов. Соответственно силой тока называют количество зарядов, прошедших за единицу времени через поперечное сечение проводника. Ток 1 А — это такой ток, когда за 1 с через поперечное сечение проводника проходит 1 Кул.

Но только давайте сразу внесем ясность. Во-первых, движение каких зарядов? Мы установили, что реальными носителями электрического заряда могут быть либо электроны, либо протоны. Другие заряженные частицы живут настолько мало, что, во всяком случае, в явлениях, описываемых в этой главе, они никакого участия не принимают. Во-вторых, какое движение? Если электроны или положительно заряженные ионы (мы не оговорились, положительный заряд иона — это заряд протонов атомного ядра) движутся совершенно беспорядочно, никакого тока нет. Ток возникает тогда, когда движение становится хотя бы частично упорядоченным, т. е. когда среднее количество движения всех заряженных частиц оказывается отличным от нуля.

Здесь в точности та же ситуация, как и в рассмотренных раньше примерах с теплотой и механическим движением. Соответственно и понятие электрического тока можно определить по-другому. Можно сказать, что сила электрического тока равна количеству заряженных частиц, участвующих в процессе, умноженному на среднюю скорость этих частиц. При вычислении средней скорости нужно учитывать реальные скорости, причем скорости положительно заряженных частиц брать со знаком плюс, а отрицательных — со знаком минус.

Протекание электрического тока по проводнику сопровождается преобразованием электрической энергии в тепловую. До чего же завидно становится, когда думаешь, какой простой и прозрачной была физика XIX века. Вот, например, электрический ток. Двигается по проводнику рой маленьких твердых блестящих шариков — электронов. Двигаясь, они сталкиваются тоже с твердыми блестящими, но побольше размером, шариками — атомами. Что случается, когда сталкиваются два шарика? Тот, который двигался, отдает часть своей энергии и замедляется, а тот, который был неподвижен (атом), начинает двигаться. Поскольку заранее никак не угадать, с какой стороны и в какой бок ударит по атому электрон, то и движение атомов оказывается совершенно беспорядочным. А это и есть тепловое движение.

Прелесть, а не картина! До того все хорошо, что даже в самых современных книгах мы нет-нет да и пытаемся объяснить электрическое сопротивление именно таким образом. Но вот ведь беда какая! Охладим этот самый проводник до температуры, близкой абсолютному нулю. Что произошло? Электроны остались, атомы остались и даже в еще большей степени находятся на своих местах, чем в случае нагретого проводника. Под действием электрического поля электроны могут двигаться — им до температуры никакого дела нет. Однако электрическое сопротивление, правда, не у всех проводников, но у многих, падает до нуля. Проводник превращается в сверхпроводник. Почему-то электроны перестают сталкиваться с атомами.

Скорость электрона, движущегося в проводнике, примерно 1 см/с. На пути в 1 см электрон встречает около 100 млн. атомов и не сталкивается ни с одним. Скажем, более того: на сегодня единственная возможность как-то объяснить многочисленные явления, связанные с поведением электронов в твердом теле, состоит в том, чтобы полностью отказаться от взаимодействия электронов с атомами. Холодный проводник или нагретый — электроны свободно проходят через всю чашу атомов или, точнее, атомных ядер, не взаимодействуя ни с одним из них. Но электрическое сопротивление все же есть? Да, есть. И причина в том, что электроны взаимодействуют с особым рода частицами, называемыми фононами.

В кристаллическом твердом теле атомные ядра довольно прочно закреплены в определенных местах, называемых узлами кристаллической решетки. Они могут совершать лишь малые колебания относительно своих положений равновесия. Тем не менее они взаимодействуют друг с другом. Стоит одному ядру как-то изменить свое состояние, все остальные это сразу «чувствуют». Чувствуют потому, что ядра непрерывно обмениваются фононами. Чем выше температура, тем больше фононов, тем чаще взаимодействуют с фононами электроны, передавая им свою энергию. Но почему электроны сталкиваются с фононами (которых, может, на самом деле и не существует) и не взаимодействуют с ядрами? Опять-таки единственное разумное объяснение этого обстоятельства таково: не взаимодействуют потому, что электрон — это все что угодно, но не твердый шарик.

В начале нашего века ученые вынуждены были сми-

ряться с мыслью, что электроны, как и все прочие элементарные частицы, имеют двойственную природу. Где-то они проявляют себя как твердые материальные частицы, а где-то как волновые процессы. Мы не станем сейчас обсуждать вопрос о том, насколько такое представление о двойственности элементарных частиц проясняет физическую картину. Вместо того чтобы говорить, что электрон когда-то обладает свойствами частицы, а когда-то свойствами волны, можно сказать просто и ясно: электрон обладает свойствами электрона, а дальше описать эти свойства. Описать их на языке математики, как это повсеместно принято в современной науке, и не пытаться найти аналогию с предметами, знакомыми на основании свидетельств наших органов чувств, по той простой причине, что такой аналогии нет.

Нравится нам это или не нравится, но современная физика не оставляет никаких сомнений: элементарные частицы — не станем забывать, что из них, и только из них, создан мир, — не имеют аналогов среди привычных нам вещей. Они не почти шарики, и не наполовину шарики, и не чуть-чуть шарики, они просто не шарики. Поэтому движущиеся в проводнике электроны не взаимодействуют с относительно большими и достаточно хорошо знакомыми нам (во всяком случае, нам так кажется) атомными ядрами и при этом взаимодействуют с трудно представимыми фононами.

Но факт есть факт: электроны передают часть своей энергии фононам, фононы, в свою очередь, отдают эту энергию ядрам. Запас тепловой энергии проводника увеличивается. В этом, кстати, причина и другого явления. Предположим, что внутри проводника создано электрическое поле. С каждой точкой поля связаны его напряженность и потенциал, численно равный работе по перенесению единичного пробного заряда из бесконечности в данную точку.

Будучи заряженным объектом, электрон испытывает со стороны поля силу, равную заряду электрона, помноженному на напряженность поля. Под действием этой силы, как следует из второго закона Ньютона, электрон должен двигаться ускоренно. Но ускоренное движение — такое движение, когда скорость увеличивается с течением времени. Значит, и сила тока, пропорциональная скорости, должна увеличиваться с течением времени. А вот на практике ничего подобного не наблюдается.

Если поле в проводнике постоянно, то и ток постоянный.

Чем это объясняется? Тем, что не успеет электрон как следует разогнаться в поле — тут же сталкивается с фононом. Отдает ему свою энергию, снова разлещается, опять сталкивается и т. д. В результате средняя скорость электрона да и всех его собратьев остается постоянной, а в проводнике выделяется тепло. Постоянное электрическое поле вызывает появление в проводнике (и только в проводнике, скажем, в вакууме все выглядело бы иначе) постоянного электрического тока. Чем больше в проводнике фоонов, тем чаще столкновения, тем меньше ток, тем сильнее нагрев. В этом смысле состояние проводника принято описывать его электрическим сопротивлением. Электрическое поле в проводнике характеризуется не напряженностью, а потенциалом, что, в общем-то, ничего не меняет, а еще точнее, разностью потенциалов на концах проводника.

Так вот, если при разности потенциалов на концах проводника 1 В сила тока в проводнике оказывается равной 1 А, то сопротивление такого проводника принимают равным 1 ому. Сила тока в проводнике прямо пропорциональна разности потенциалов и обратно пропорциональна сопротивлению. Эта истина, получившая название закона Ома, известна всем с детства. Кроме того, в проводнике выделяется тепло при передаче энергии от электронов фоонам.

Всюду поперек

Любой электрический заряд, движущийся в пространстве, вызывает появление в этом пространстве еще одного поля — магнитного. Странное это поле! Электрическое поле можно обнаружить всегда, когда в него вносят электрический заряд, а магнитному полю одного заряда мало. Как обнаружить наличие магнитного поля? Нужно, чтобы этот заряд (по-прежнему назовем его пробным) двигался с некоторой скоростью. С каждой точкой магнитного поля связывают векторную величину, называемую магнитной индукцией и равную по величине и направлению той силе, с которой магнитное поле действует на движущийся единичный электрический заряд.

Представьте себе игрушечный кубик. Вот он перед вами, повернут к вам какой-то гранью, значит, видите

вы, в общем-то, не кубик, а квадрат. Задержите внимание на левом нижнем углу квадрата. Применительно к кубику это вершина. Из нее отходят три ребра: одно — вправо, второе — вверх, а третье — назад. Так вот, если направление скорости заряда совпадает с ребром вправо, а направление векторной величины, называемой магнитной индукцией, совпадает с ребром назад, то направление силы, действующей на заряд, совпадает с ребром вверх. Так обстоит дело с направлениями этих трех векторных величин. Что касается силы, то она равна произведению трех величин: самого заряда, его скорости и магнитной индукции. Вы, конечно, помните, что за направление электрического тока принимается направление движения положительных электрических зарядов. Если ток образуется отрицательными зарядами, его направление противоположно направлению движения зарядов. То же самое справедливо и для магнитной индукции.

В электрическом поле его напряженность совпадает по направлению с силой, действующей на пробный заряд. В случае магнитного поля магнитная индукция перпендикулярна направлению действия силы. Так сложилось исторически — вектор магнитной индукции решено было направлять в ту сторону, куда отклонялась магнитная стрелка в опытах Эрстеда. Сейчас можно было бы придумать другое определение магнитной индукции, но это мало что дало бы, поскольку все равно сила, действующая на заряд, остается направленной перпендикулярно направлению движения заряда. Такое уж это интересное поле — магнитное: оно направлено всюду поперек.

Как образуется магнитное поле? От читателя требуется сейчас пространственное воображение. Положите перед собой лист бумаги и в любом его месте поставьте карандашом точку. Пусть это будет точка, в которой надо определить магнитную индукцию. Представьте, что какой-то положительный электрический заряд движется вдоль вертикальной прямой линии снизу вверх. И пусть эта линия пройдет через лист бумаги в какой-то другой точке. Соедините карандашом эти две точки прямой линией, а из той точки, в которой определяется индукция, проведите вторую линию, перпендикулярную первой и направленную от вас. Это и есть направление магнитной индукции поля, порождаемого движущимся зарядом.

Что касается величины магнитной индукции, то она прямо пропорциональна величине заряда и его скорости и обратно пропорциональна квадрату расстояния от заряда до точки, в которой определяется индукция. Очень важно, что именно квадрату расстояния. Это роднит магнитную индукцию с напряженностью электрического поля. А в остальном, как видите, снова все повсюду «поперек». Чтобы быть совсем строгим, следует добавить, что произведение величины заряда и его скорости, деленное на квадрат расстояния, нужно еще помножить на синус угла между направлением движения заряда и линией, соединяющей местоположение заряда с точкой, в которой определяется индукция.

Так что же такое магнитное поле? Коротко можно сказать, что это пространство, в котором обнаруживается взаимодействие двух движущихся электрических зарядов. Достаточно одному из них, любому, стать неподвижным, как магнитное взаимодействие между ними немедленно прекратится. И еще интересное свойство. Посмотрите на ваш лист бумаги и проведите на нем окружность произвольного радиуса с центром в точке, где траектория движущегося заряда проходит через лист. В какой бы точке этой окружности вы ни определяли магнитную индукцию, она всегда направлена по касательной, и, обойдя вокруг, вы вернетесь в ту же точку, откуда начали. Говорят, что линии магнитного поля не имеют источников в отличие от поля электрического, у которого все векторы напряженности в конечном итоге выходят из точки, где расположен заряд. Часто считают, что магнитные силовые линии Земли выходят из магнитных полюсов. Это неверно. Магнитные силовые линии пронизывают земной шар, а магнитные полюса — это лишь точки, через которые проходит наибольшее число линий. Что из этого следует? Не существует никаких магнитных зарядов, в том числе и одиночных пробных.

Это обстоятельство не дает покоя некоторым ученым. В периодической печати появляются сообщения о том, что то ли уже открыт, то ли вот-вот будет открыт так называемый магнитный монополюс — магнитный заряд одного знака. Однако вскоре выясняется, что это была ошибка. Сегодня можно уверенно сказать, что никаких монополюсов пока не найдено. Более того, вероятность обнаружить магнитный монополюс весьма мала.

Обладает ли магнитное поле энергией? Если да, то какой? Все дело опять-таки в свойстве магнитного поля быть всюду «поперек». Энергия — это способность совершать работу, а работа численно равна произведению силы на отрезок пути, пройденный под действием этой силы. Так вот, в магнитном поле сила действует в направлении, перпендикулярном к направлению движения заряда, и ничто, кроме заряда, наличие магнитного поля не ощущает. Изменится направление движения заряда — изменится и направление силы. Ну а ясно, что сила, направленная поперек направления движения, работы совершить не может — вспомните лебедя, рака и шуку!

Приведем интересный пример. Сейчас все большее распространение получает транспорт на магнитной подвеске. Железнодорожные вагоны на магнитной подвеске уже вышли из стен лабораторий и в самом скором времени появятся на стальных магистралях. Стоит задуматься, насколько это важно. Вся история развития транспорта — это история борьбы с трением. Борясь с трением, в свое время человек изобрел колесо, а затем и подшипники качения. Этой же цели служит рельс и асфальтовое покрытие шоссейных дорог. Борьба с трением снабдила транспортные средства крыльями и перевела их в воздушную стихию. Водный транспорт также постепенно «взобрался» на подводные крылья, а затем на воздушные подушки. Но полностью от трения избавиться так и не удалось. Ведь и у самолета большая часть тяги двигателя затрачивается на преодоление сопротивления воздуха.

А тут вагон, который абсолютно ничего не касается, удерживается на весу исключительно силами магнитного поля. Вы скажете, что трение о воздух все-таки остается. Правильно. Но если самолету и кораблю на воздушной подушке воздух необходим, то вагону на магнитной подвеске воздух ни к чему. С наличием воздуха попросту приходится мириться: если понадобится, то вагон на магнитной подвеске можно поместить в трубу, а воздух оттуда выкачать.

Расчеты показывают, что на создание магнитного поля, которое удерживало бы на весу движущийся железнодорожный вагон (представьте себе эту грандиозную картину!), нужно затратить мощность всего 60 Вт, т. е. такую же, какую потребляет одна не слишком яркая

электрическая лампочка. В этом нет ничего удивительного, ведь силы поля, удерживающие вагон на весу, направлены снизу вверх. Но в этом направлении вагон не движется. А если не движется, значит, магнитное поле не совершает никакой работы. Не совершает работы — не нужны затраты энергии. Еще раз обратим ваше внимание, ведь это так интересно: железнодорожный вагон несется вперед, ничего не касаясь! И при этом теоретически не требуется никаких затрат энергии. Не надо даже периодически менять стершиеся подшипники у колес, которых нет, или обновлять смазку. Затраты энергии нужны лишь на трогание и торможение и, конечно, на компенсацию потерь (на тепло) в проводах, подводящих электрический ток.

Но как же так — никаких затрат? А 60 Вт? Они тратятся лишь на поддержание вагона в вертикальном положении. Тут мы сталкиваемся с одним примечательным свойством, которым обладают и магнитное поле, и электрическое, и вообще все поля, у которых сила взаимодействия обратно пропорциональна квадрату расстояния. Заключается оно в том, что, как система, составленная из одних электрических зарядов, так и система, составленная из одних проводников с током, оказывается неустойчивой. Если взять только электрические заряды, положительные и отрицательные, то невозможно найти такую их конфигурацию — взаимное расположение, при котором они оказались бы в равновесии. Как ни располагай такие заряды, стоит предоставить их самим себе, они тут же придут в движение. Оно закончится лишь тогда, когда заряды либо соберутся все вместе, либо разлетятся на бесконечные расстояния друг от друга. То же самое справедливо и для магнитного поля. Вы можете легко убедиться в этом, взяв два постоянных магнита и стальной шарик. Сколько бы вы ни мучились, вам не удастся найти такое положение, чтобы шарик оставался неподвижным между двумя магнитами. Он обязательно в конце концов притянется к одному из них, и его дальнейшее движение прекратится за счет чисто механического контакта.

Подвесить вагон только с помощью системы постоянных магнитов, какими бы мощными эти магниты ни были, невозможно. Он обязательно или упадет, или притянется к одному из магнитов, а тогда возникнет механическое соприкосновение и, конечно, трение. Но вагоны

на магнитной подвеске существуют! И уже сегодня перевозят людей и грузы. Делается вот так. Вагон снабжают специальным прибором — датчиком, который измеряет высоту расположения вагона. Измеряет очень точно, с ошибкой, не превышающей доли миллиметра. Сигнал от датчика управляет силой электрического тока, образующего магнитное поле подвески.

Стоит вагону чуточку опуститься, немедленно подается сигнал — магнитное поле усиливается и вагон подтягивается вверх. Наоборот, стоит вагону чуточку подняться, снова сигнал — поле ослабляется и вагон опускается. Все это, вместе взятое, называется следящей системой, а в результате вагон остается подвешенным и лишь слегка подрагивает: вверх-вниз-вверх-вниз. На эти подрагивания и затрачиваются работа, а следовательно, и энергия — те самые 60 Вт. Как тут снова не вспомнить штангиста. У него все происходило точно так же.

Вроде бы напрашивается вывод, что постоянное магнитное поле не совершает и не может совершить работу, а вот переменное... Но не станем торопиться. Рассмотрим еще одно интересное свойство, в данном случае касающееся одновременно и электрического и магнитного полей. Сначала немного теории. Пусть где-то в пространстве имеются два постоянных поля: электрическое, например между пластинами заряженного конденсатора, и магнитное, например между полюсами подковообразного постоянного магнита. Магнит и конденсатор расположены таким образом, что напряженность электрического поля повсюду направлена перпендикулярно магнитной индукции.

Что показывает теоретический анализ? В пространстве, занятом такими полями, равномерно распределено количество движения. Каждый кубический сантиметр такого пространства обладает количеством движения, величина которого пропорциональна произведению напряженности электрического поля и магнитной индукции. Направлено это количество движения опять-таки поперек, т. е. перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы напряженности электрического поля и магнитной индукции.

Но откуда же количество движения, если и электрическое и магнитное поля постоянные? Здесь нет никаких объектов, которые бы двигались, более того, вели-

чины, характеризующие систему, не меняются. Свыкнуться с тем, что количество движения все-таки имеется, чрезвычайно трудно даже человеку, искушенному в физике. Количеством движения, например, обладает свет. Но световой луч все-таки движется! А здесь полное постоянство. Причем, заметьте, что если между пластинами конденсатора, как говорят, нет утечки, изоляция идеальная, то система из конденсатора и магнита может просуществовать хоть миллион лет и ничто в ней не изменится. Электрическое и магнитное поля останутся теми же самыми. Может, здесь вкралась какая-нибудь ошибка?

Достоверность всякой теории подтверждается экспериментом. Такой эксперимент был поставлен. Конденсатор, состоящий из двух цилиндров — внутреннего и наружного, подвесили на тонкой шелковой нити между полюсами постоянного магнита. Конденсатор зарядили, и, как следовало ожидать, ничего не произошло. В пространстве между цилиндрами действовало, во-первых, электрическое поле, направленное к оси цилиндров, во-вторых, магнитное поле, направленное снизу вверх. Как полагали теоретически, всюду в пространстве между цилиндрами существовал вектор количества движения, направленный против часовой стрелки. Поскольку пластины конденсатора имели форму цилиндра, то здесь речь шла о моменте количества движения.

Система оставалась в покое сколь угодно долго, и ничего в ней не менялось. Изоляция между пластинами конденсатора была хорошей, а постоянный магнит — на то он и постоянный. Но вот разрядили конденсатор, причем не прикасаясь к пластине, а осветив воздух между пластинами рентгеновскими лучами и сделав его тем самым проводящим. Исчезло электрическое поле, исчез и момент количества движения. Но как может исчезнуть момент количества движения? Ведь он подчиняется закону сохранения. Правильно, не может. Поэтому цилиндры на нитке начали вращаться. Момент количества движения, на этот раз обычного механического движения, оказался равным теоретически рассчитанному моменту, пропорциональному, как мы и говорили, произведению напряженности электрического поля и магнитной индукции. Теперь приходится признать, что электрическое и магнитное поля, направленные перпендикулярно друг другу, обладают магнитной индукцией.

Так что же все-таки движется?

Чтобы не оставалось никаких сомнений в том, что электрический ток — это действительно движение электрических зарядов, в частности электронов, в 1916 году американцы Стюарт и Толмен поставили такой опыт. Они раскрутили катушку с проводом, а потом быстро ее затормозили. В момент торможения присоединенный к концам провода гальванометр зарегистрировал прохождение электрического тока. Казалось бы, что может быть убедительнее? Раскручиваем катушку с проводом, и находящиеся в проводе электроны раскручиваются вместе с катушкой. Потом катушка резко тормозится. Но электроны в проводнике свободны. После того как катушка остановилась, они продолжают двигаться по инерции, как положено материальным объектам, обладающим массой, и создают электрический ток.

Стюарт и Толмен не первыми обнаружили факт появления тока. Еще до них, в 1913 году это сделали русские физики Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси. Но Стюарт и Толмен в своем опыте определили очень важную величину: отношение заряда электрона к массе электрона. Эта величина также определялась до них в других опытах, но важно было то, что результаты Стюарта и Толмена совпали с ранее полученными значениями.

Нам хотелось бы предостеречь вас. Опыт Стюарта и Толмена, казалось бы, восстанавливает в нашем сознании старую картину. Проводник наполнен маленькими шариками — электронами. Раскрутили катушку, раскрутились и шарики. Затормозили катушку — шарики продолжают двигаться по инерции. Почему? Потому что, раскручивая катушку, сообщили шарикам определенный запас кинетической энергии, а энергия не исчезает бесследно. После остановки катушки шарики сохраняют свой запас кинетической энергии, т. е. движутся с определенной скоростью. Количественное совпадение результатов Стюарта и Толмена с результатами других опытов свидетельствует о том, что каждый электрон обладает именно тем запасом кинетической энергии, который был ему сообщен при раскручивании катушки.

Поразительно, до чего все представляется простым, когда только скользишь по поверхности явлений. Но как же быть с магнитным полем? Откуда оно берется, если вся энергия движущегося электрона — это механическая

кинетическая энергия, равная полупроизведению его массы на квадрат скорости? Именно такую величину энергии и дает опыт Стюарта и Толмена.

С одной стороны, движущийся электрон обладает не только кинетической энергией, но и количеством движения, равным произведению массы электрона на его скорость. С другой стороны, электрон, как и всякий электрический заряд, окружен электрическим полем, напряженность которого направлена вдоль линий, исходящих из электрона как из центра. Возьмите ваш лист бумаги (мы надеемся, что вы его еще не выбросили) и снова представьте себе, как электрон, а еще лучше положительный заряд — тогда вам не придется думать о знаках — движется вдоль прямой линии, пронзающей лист бумаги снизу вверх и перпендикулярной к его плоскости. Представьте себе, что заряд именно в сию минуту проходит сквозь лист бумаги. Проведите прямую линию из точки, где заряд протыкает бумагу, в данную точку. Продолжите ее и пририсуйте на кончике стрелку. Это и есть вектор напряженности электрического поля для описанной ситуации.

Ну а вектор магнитной индукции? Мы уже не раз имели случай убедиться: он исходит из той же точки, но перпендикулярен к линии, соединяющей точки, т. е. перпендикулярен к вектору напряженности электрического поля. А вектор количества движения? При таких условиях он перпендикулярен к листу бумаги и направлен в ту же сторону, куда движется заряд. Итак, электромагнитное поле, окружающее движущийся заряд, обладает собственным количеством движения, причем если аккуратно посчитать, то получается, что полное количество движения всего поля равно массе этого поля (помните, мы однажды установили, что поле обладает массой), помноженной на скорость движения заряда.

Так что же обладает количеством движения? Электрон или поле? И еще один вопрос. Из приведенных рассуждений вроде бы следует, что электромагнитное поле, в частности его магнитная составляющая, обладает массой. Действительно, есть магнитная составляющая — есть количество движения, нет магнитной составляющей — нет количества движения. Обладать массой — все равно что обладать энергией. Вообще, давайте постепенно привыкать, что масса и энергия — это просто два различных слова, обозначающих одно и то же свойство

материи. Но если все так, что же тогда обладает кинетической энергией? Движущийся электрон или его электромагнитное поле? Конечно, можно предположить, что энергия как-то делится. Часть ее принадлежит электрону, а часть — полю. Но ведь в опыте Стюарта и Толмена явно было показано: вся кинетическая энергия электронов есть полупроизведение массы на квадрат скорости.

Остается еще маленькая надежда. Может быть, магнитное поле в отличие от электрического не несет в себе энергию? Ведь оно действительно вроде бы неспособно совершить работу. Может быть, магнитное поле лишь свидетельствует о том, что заряд движется и обладает кинетической энергией? Что ж, давайте посмотрим, какими фактами мы располагаем.

Представьте себе такой опыт. Раскручиваете катушку с проводом, такую же, как в опыте Стюарта и Толмена, только к концам провода подсоединен не гальванометр, а электрическая плитка. Раскрутили катушку, а потом резко ее затормозили. Сначала в катушке потечет ток. Но ток этот постепенно уменьшается до тех пор, пока вся запасенная электронами кинетическая энергия не превратится в тепло в электроплитке. Количество тепла можно измерить. Но не надо даже тратить время на подобные измерения. Из многочисленных опытов, сделанных ранее, не совсем, правда, таких, как только что описанный, с полной очевидностью следует: количество выделившегося тепла равно той кинетической энергии, которую сообщили электронам, раскручивая катушку. Снова все, казалось бы, свидетельствует о том, что никакой энергией магнитное поле не обладает.

Но тогда следующий опыт. Не станем больше вращать катушку, это далеко не самый эффективный способ создать в проводнике ток. Возьмем лучше проводник, а еще лучше сверхпроводник, чтобы не мешали процессы, связанные с выделением тепла, и подсоединим к нему батарейку. По проводнику потечет ток. Отключим батарейку и замкнем концы проводника между собой. Поскольку это сверхпроводник, протеканию тока в нем ничто не мешает, и ток продолжает протекать, несмотря на отсутствие батарейки. И это не какой-то мысленный опыт. Именно сверхпроводниковые катушки используются в магнитах, удерживающих железнодорожные вагоны в системах магнитной подвески.

Представьте себе колечко из сверхпроводника, по ко-

тому течет ток и которое окружено магнитным полем. Если это сверхпроводник, продолжаться так может сколько угодно долго. А теперь сделаем следующее. Поднесем к сверхпроводниковому колечку другое колечко, такое же по размерам, но выполненное из обычного проводника, обладающего сопротивлением. Ток в сверхпроводящем колечке уменьшится. Возможно, что второе колечко придется подносить и отводить несколько раз. Но результат известен и однозначен. Закончатся все эти опыты полным прекращением тока в сверхпроводящем колечке.

Куда же девалась кинетическая энергия электронов? Вдумайтесь, и вы сами придете к выводу, что на этот вопрос есть единственный ответ. Через магнитное поле кинетическая энергия электронов передалась колечку из обычного проводника, а там превратилась в тепло. Мгновенно это произойти не могло. Любое взаимодействие совершается не быстрее, чем со скоростью света. Значит, в течение какого-то времени, пусть очень короткого, магнитное поле обладало энергией, которую оно отдало проводящему колечку.

Можно продолжать эти рассуждения, приводить аргументы еще и еще, но, наверное, вы уже почувствовали единственный вывод, который не вызовет чувства протеста: энергия, причем именно вся кинетическая энергия движущегося заряда, сосредоточена в его электромагнитном поле. А отсюда с неизбежностью следует: электрон — это не шарик. Электрон — это не шарик наполовину и не шарик на одну четверть. То, что мы называем массой электрона, и то, что проявляется как масса в опыте Стюарта и Толмена, это свойство всего комплекса, существенную часть которого составляет электромагнитное поле.

Говорит Москва

Магнитное поле не имеет источника. Линии магнитного поля всегда замкнуты, нигде не начинаются и нигде не кончаются. В противоположность этому электрическое поле имеет источник, причем таким источником является заряд, порождающий поле. Всегда ли? Нет, не всегда. Электрическое поле возникает всякий раз, когда изменяется поле магнитное. Это и есть знаменитый закон магнитной индукции, открытый Фарадеем. Помните, он долго носил в кармане магнит и катушку, дома, в гостях,

в театре нет-нет да доставал магнит и катушку из кармана и пытался как-то их совместить. Наконец догадался, что надо подвигать магнит внутри катушки. При движении магнита изменяется магнитное поле и тут же возникает поле электрическое. Электрическое поле — ему придумали специальное название «электродвижущая сила», или сокращенно эдс,— приводит в движении электроны в проводнике.

Наоборот, меняющееся электрическое поле обязательно порождает поле магнитное. С одним частным случаем этого явления вы уже познакомились, когда рассматривали движущийся заряд. Если заряд движется, напряженность электрического поля в любой неподвижной точке меняется. Но оказывается, можно обойтись и без движущегося заряда. Каким бы способом вы ни меняли электрическое поле, каждый раз эти изменения порождают магнитное поле.

И вот теперь рассмотрим такую ситуацию. В некоторой области пространства имеется постоянное электрическое поле, порождаемое каким-нибудь источником. Например, заряженным конденсатором, как в рассмотренном ранее примере. А теперь уничтожим источник, разрядив конденсатор (опять-таки как в предыдущем примере). Исчезнет ли поле? Нет, не исчезнет. Ведь электрическое поле — уж это-то мы знаем точно — содержит в себе запас энергии, а энергия не исчезает. Но существовать без источника электрическое поле тоже не может. Как только конденсатор разряжается, поле начинает убывать. Эти изменения тут же порождают магнитное поле. Постепенно все электрическое поле сходит на нет и передает свою энергию магнитному полю. Теперь уж нам некуда деваться, приходится признать, что магнитное поле обладает энергией и, в частности, ему может быть передан весь запас энергии, содержащийся ранее в электрическом поле.

Но магнитное поле тоже не существует само по себе. В предыдущих примерах магнитное поле порождалось током, теперь — меняющимся электрическим полем. Электрическое поле, по нашему собственному признанию, сошло на нет. Как только это произошло, начинает убывать поле магнитное. А убывание, т. е. изменение, магнитного поля порождает поле электрическое и т. д. Качок вправо — качок влево. Ну а энергия? Энергия, как и положено быть, остается неизменной. Электричес-

кое поле передает свою энергию магнитному, а магнитное — электрическому. Бывают мгновения, когда существует одно электрическое поле или одно только магнитное, а бывают мгновения, когда энергия как-то распределена между тем и другим.

Так выглядит этот процесс во времени. Ну а в пространстве? Происходят ли взаимные преобразования в одном и том же месте или как-то иначе? Мы уже настолько подкованны, что ответим на такой вопрос, не заглядывая в учебник. Всегда, когда в одной и той же области пространства имеется и электрическая и магнитная составляющая электромагнитного поля, такая область обязательно обладает каким-то количеством движения. В рассматриваемом случае это количество движения проявляется явно, и сгусток переплетенных друг с другом и взаимопревращающихся электрического и магнитного полей движется в пространстве со скоростью, равной скорости света.

Также не заглядывая в учебник, можно сразу ответить на вопрос, куда движется сгусток полей, или, как его иначе называют, электромагнитная волна? Двигается он туда, куда направлен вектор количества движения, а направлен он перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы напряженности электрического поля и магнитной индукции. Можно сказать и иначе. Векторы напряженности электрического поля и магнитной индукции в электромагнитной волне всегда направлены перпендикулярно направлению ее движения, а заодно и перпендикулярно друг другу. Говорить о реальности описанного процесса не приходится. Именно так осуществляются телевизионные и радиопередачи.

Трансформатор

Похоже, что наш рассказ об электрической (теперь, наверное, следует сказать электромагнитной) энергии подходит к концу. Энергия эта сосредоточена в электромагнитном поле. Электрическая и магнитная составляющие этого поля способны взаимно переходить друг в друга. При этом энергия передается от электрического поля магнитному и от магнитного поля электрическому. Все это подтверждено огромным количеством опытов и лежит в основе принципа действия всевозможных приборов и устройств. Известно также, что количество энергии,

приходящееся на 1 см^3 пространства, заполненного магнитным полем, пропорционально квадрату магнитной индукции. Все точно так же, как было в случае электрического поля. Возьмите катушку с проводом и подсоедините концы этого провода к источнику переменного электрического напряжения. По проводу потечет ток, тоже переменный. Переменный ток образует вокруг катушки переменное магнитное поле, а переменное магнитное поле вызовет появление электрического поля, которое, в свою очередь, создаст между концами провода переменную разность потенциалов. Эта переменная разность потенциалов получила свое специальное название: эдс самоиндукции. В любой момент времени эдс самоиндукции равна по величине и противоположна по знаку эдс внешнего источника. Поэтому если сопротивлением провода, из которого намотана катушка, можно пренебречь, энергия в такой системе не тратится. Происходит периодический обмен. Сначала за счет энергии, забираемой от внешнего источника, образуется окружающее катушку магнитное поле. Затем это магнитное поле начинает убывать (напоминаем, ток переменный) и накопленная в нем энергия возвращается в источник.

На этом явлении основан принцип действия дросселей (катушек индуктивности), включаемых последовательно с хорошо известными всем электролюминесцентными лампами, или, как их называют в быту, лампами дневного света. Задача дросселя — не дать току, протекающему через лампу, превысить некоторое определенное значение. Чем больше ток, тем больше магнитное поле, тем больше эдс самоиндукции. Но эдс самоиндукции имеет противоположный знак и, следовательно, вычитается из напряжения источника. Увеличение тока сопровождается уменьшением напряжения на лампе и соответственно уменьшением тока. При самопроизвольном уменьшении тока все происходит наоборот.

Примерно то же самое происходило бы в том случае, если последовательно с лампой дневного света включить обычный проводник, обладающий сопротивлением. Но при этом часть электрической энергии, получаемой от сети, преобразовывалась бы в тепло. А зачем нагревать атмосферу? Зимой еще куда ни шло, а летом? Дроссель тем и хорош, что в нем энергия почти не затрачивается и ни во что не преобразовывается. В течение какого-то промежутка времени (говорят, в течение полупериода)

энергия забирается из сети и расходуется на образование магнитного поля. В течение другого какого-то промежутка времени (вторая половина периода) магнитное поле сходит на нет, а накопленная в нем энергия возвращается обратно в сеть. Все получается очень хорошо, только уж очень гудят эти дроссели.

Теперь сделайте такой опыт. Поместите в магнитное поле катушки с переменным током еще одну такую же точно катушку. Что произойдет? Да ничего нового. Магнитное поле создает в обеих катушках, если они находятся в одинаковых условиях, одинаковые эдс. Только эдс первой катушки называется эдс самоиндукции, а эдс второй катушки — просто эдс индукции.

Казалось бы, ничего нового не происходит. В первой катушке электрическая энергия от источника переменного напряжения преобразуется в энергию магнитного поля, а во второй катушке энергия магнитного поля снова превращается в электрическую энергию.

Такая конструкция из двух катушек называется трансформатором. Для того чтобы обе катушки, или, как говорят, обе обмотки, трансформатора находились по возможности в одинаковых условиях, внутрь катушек помещают металлический сердечник, который сосредоточивает в себе магнитное поле, не дает ему «расползаться». Где только их нет, этих трансформаторов! Начиная с огромных, величиной с дом на трансформаторных подстанциях в линиях электропередач и кончая крохотными трансформаторчиками карманных радиоприемников.

Снова, кажется, все ясно, но посмотрим чуть подробнее. Две катушки находятся в одинаковых условиях в общем магнитном поле. Катушки одинаковые (т. е. одинаково число витков), значит, и эдс в них одинаковые. Замкнем накоротко выводы второй катушки. Очевидно, по ней потечет ток. Этот ток, в свою очередь, вызовет появление своего, нового магнитного поля. Но эдс самоиндукции имеет знак, противоположный знаку эдс внешнего источника, подсоединенного к первой катушке. А если так, ток во второй катушке будет направлен противоположно току первой катушки. Противоположно будет направлено и магнитное поле, создаваемое током второй катушки. Магнитное поле второй катушки вычитается из магнитного поля первой катушки, и в сумме они дают нуль. Да, да, именно нуль. Так происходит в любом трансформаторе. Энергия, передается из первой катушки

во вторую, но при этом в пространстве, окружающем обе катушки, нет никакого поля, ни магнитного, ни электрического. В реальных трансформаторах магнитное поле все-таки есть. Но это так называемое поле рассеяния, возникающее из-за того, что катушки всегда немного неодинаковы.

Так что, произошло очередное чудо? Снова, в который уже раз, на страницах этой книги мы сталкиваемся с одной и той же ситуацией. Все зависит от того, как рассуждать. Если рассуждать, пользуясь понятиями эдс, силы тока, магнитной индукции, то иначе как чудом только что рассмотренную ситуацию не назовешь. Действительно, вторая катушка замкнута накоротко и полностью изолирована от внешнего мира. В окружающем ее пространстве ничего нет: ни электрического, ни магнитного поля. Тем не менее эдс в ней существует и ток через нее протекает.

Секрет в том, что и сила тока, и эдс, и магнитная индукция так же, как и сила в предыдущей главе,— все это выдуманные величины, а значит, не подчиняющиеся законам сохранения, поэтому они могут возникать не из чего и исчезать бесследно. Вспомните, ведь магнитная индукция — это просто сила, а электрический ток — количество заряда, проходящего через сечение проводника. А проходит ли этот заряд, мы так до сих пор толком и не знаем.

Те же самые рассуждения звучат совсем иначе, если за основу взять величину, подчиняющуюся закону сохранения, в данном случае энергию. С самого начала мы условились считать, что сопротивления проводников, из которых намотаны катушки, или равны нулю, или настолько малы, что ими можно пренебречь. Что происходит во второй катушке с учетом последнего условия? Энергия в ней не превращается в тепло, а следовательно, не тратится. Если так, то не нужно компенсировать затраты, т. е. не нужно передавать энергию из первой катушки во вторую. А раз энергия из первой катушки во вторую не передается, ни к чему и магнитное поле. Как видите, с позиций «правильных» физических законов никаких чудес не происходит. А значит все сказанное лишь то, что в идеальном трансформаторе без потерь (на самом деле такого, конечно, не существует) отсутствие затрат энергии во вторичной обмотке влечет за собой отсутствие затрат энергии и в первичной обмотке.

Вы скажете:

— Ток во второй катушке, или, говоря более привычным языком, во вторичной обмотке трансформатора все-таки протекает. Причем ток — это объективная физическая величина, его можно измерить амперметром!

Что касается последнего замечания, то позвольте с вами не согласиться. Не существует амперметра, между зажимами которого не было бы хоть крохотного, но все же отличного от нуля сопротивления. При протекании тока через амперметр на его сопротивлении падает какое-то напряжение. Произведение этого напряжения на силу тока дает мощность. Отклонение стрелки амперметра пропорционально именно мощности. Другими словами, чтобы отклонить стрелку амперметра, нужно затратить работу, и работа эта выполняется за счет энергии, потребляемой амперметром из электрической цепи, в которой производится измерение. С помощью одного тока, без затраты энергии стрелку амперметра не отклонишь. Следовательно, измерив ток, мы вывели из системы часть ее энергии, а это повлечет за собой уменьшение этого самого тока. Здесь имеет место уже знакомая нам ситуация с температурой, которую мы якобы ощущаем.

Мы вынуждены констатировать, что в этой главе столкнулись по меньшей мере с двумя непреодолимыми трудностями. Первая связана с радиусом электрона. Если он равен нулю, то энергия электрического поля обращается в бесконечность. Если он не равен нулю, то спрашивается, что у электрона внутри? Все это подробно обсуждалось в начале главы. Вторая трудность связана с тем, что все же остается непонятным, как взаимодействуют катушки трансформатора. Хотя явных нарушений физических законов тут не видно, но должна быть какая-то причина появления эдс и тока во второй катушке. Повторим еще раз: вопрос с радиусом электрона на сегодня не снят. Можно сделать лишь одно замечание, которое совсем не претендует на решение этого вопроса, а только позволит читателю кое о чем задуматься. Нет ли в проблеме радиуса электрона чего-нибудь общего со старой проблемой Ахиллеса и черепахи?

Вспомните, как вы создавали заряд. Носили маленькие его порции из бесконечности в данную точку. При этом мы сразу договорились, что в одном и том же месте

две порции не разместишь, поэтому носили вы их в разные места внутри какой-то сферы. Ну а если электрон имеет точечные размеры? Это значит, что все порции заряда вам надо носить в одно и то же место. В одно и то же место нельзя, но сколь угодно близко подойти к этому месту можно. Делается это уже известным приемом: пройти столько, потом еще полстолько, потом четверть столько и т. д. В результате получается бесконечное число шагов.

Бесконечность получается потому, что мы предполагаем пространство однородно заполненным полем и пространство это мы считаем бесконечно делимым. Никакой бесконечности не будет, если считать, что поле состоит из маленьких порций — квантов. В конечной области пространства квантов тоже будет конечное число.

Развивая ту же идею, можно снять и вторую трудность. Представьте себе, что первая катушка порождает магнитное поле в виде множества частичек — квантов. Кванты эти движутся от первой катушки к второй. Когда вы замыкаете выводы второй катушки, по ней начинает течь ток и возникает магнитное поле, также состоящее из квантов, движущихся от второй катушки к первой. Пространство между катушками оказывается заполненным квантами, движущимися в противоположные стороны. Кванты есть, а суммарное количество их движения равно нулю. Поэтому вы и не воспринимаете то, что находится в пространстве между катушками. Ситуация похожа на то, что происходит в неподвижном твердом теле. Молекулы его движутся, а сумма их количеств движения равна нулю, и тело остается неподвижным.

Привлекая принципы квантовой механики, можно довольно правдоподобно объяснить, что происходит внутри цилиндрического конденсатора, подвешенного между полюсами постоянного магнита. Электрическое поле — постоянное, магнитное поле — постоянное, а кванты электромагнитного поля движутся и создают отличный от нуля момент количества движения. Не замечаем мы движения квантов потому, что движутся они по замкнутым траекториям. Стоит одному кванту уйти из некоторой области пространства, как туда сразу приходит другой, и среднее количество квантов, приходящееся на единицу объема, не меняется. Похожая картина получится, если заставить воду течь по круговому замкнутому желобу. Вы никак не сможете обнаружить

это течение, потому что количество воды в единице объема все время одно и то же. Чтобы обнаружить течение воды, нужно бросить в нее щепку. Примерно то же самое делают, разряжая конденсатор.

Мы не претендуем здесь на решение проблем, которые в современной физике остаются нерешенными. Мы лишь сообщаем читателю некоторые идеи, демонстрирующие, в частности, плодотворность квантового представления электромагнитных полей. Но самая главная трудность у нас впереди. Чтобы уяснить, в чем эта трудность состоит, давайте совершим небольшое путешествие в вагоне на магнитной подвеске.

Представьте себе для простоты, что вагон движется с постоянной скоростью вдоль прямолинейного пути. Для того чтобы вагон не падал на землю, к нему нужно приложить силу, направленную вертикально вверх. Вы уже знаете, что такая сила действует на электрический заряд, движущийся в ту же сторону, что и вагон, если при этом создать магнитное поле, индукция которого лежит в горизонтальной плоскости и направлена перпендикулярно направлению движения вагона.

Все это совсем нетрудно организовать. Вагон надо зарядить. Двигаясь сам, он двигает вместе с собой электрический заряд, а магнитное поле, как это нетрудно сообразить, возникнет в том случае, если вдоль пути вагона проложить проводник и пропустить по нему постоянный электрический ток в том же направлении, в котором движется вагон. Нужно как следует представить себе эту картину, и если вам, дорогие читатели, что-то остается неясным, перечитайте начало этой главы или школьный учебник физики. Мы очень просим вас сделать это, потому что вывод, к которому мы сейчас придем, честное слово, заслуживает усилий.

Стоим на платформе и провожаем глазами уносящийся вдаль вагон на магнитной подвеске. Все происходит как положено. Вагон несет на себе электрический заряд, этот заряд движется с заданной скоростью, и направленная вертикально вверх сила удерживает вагон от падения. Мы можем быть спокойны за судьбу отправившихся в путешествие. А теперь представьте себе, что вы находитесь внутри вагона. Что вы видите? Вы видите то, что электрический заряд неподвижен. Раз он неподвижен, магнитное поле на него не действует. Вагон должен обрушиться вниз. Ну что вы на это скажете?

Если мы и совершили какую-нибудь ошибку, то совершили ее гораздо раньше. Тогда, когда стали утверждать, что магнитное поле, мол, действует на движущиеся заряды и не действует на неподвижные. Хорошо известно, что не существует абсолютного движения и абсолютного покоя.

Придется начинать рассуждения сначала, и прежде всего представьте себе проводник, тот самый, который служит для создания магнитного поля. Проводник, как и все прочие тела, состоит из положительно заряженных атомных ядер и отрицательно заряженных электронов. Атомные ядра в основном остаются неподвижными относительно проводника. Следовательно, положительные электрические заряды также неподвижны относительно проводника. Электроны же (правда, не все, но сейчас это не существенно) могут свободно перемещаться относительно проводника. Это мы знаем точно. Достаточно вспомнить хотя бы опыт Стюарта и Толмена.

Пусть для начала никакого тока по проводнику не течет. Важное свойство всех окружающих нас тел, в том числе и проводников, состоит в том, что в обычных условиях они, как говорят, электрически нейтральны. Это значит, что количество положительных зарядов равно количеству электронов и уже с очень небольших, порядка нескольких микрон, расстояний от проводника никаких зарядов в этом проводнике обнаружить не удастся. Положительные заряды ядер компенсируются отрицательными зарядами электронов.

Если проводник длинный, то лучше говорить не о полном количестве электронов и атомных ядер, оно, очевидно, зависит не от длины проводника, а от количества тех и других, приходящихся на единицу длины проводника, скажем на 1 см. От этого, правда, ничего не изменится. Количество положительных зарядов, приходящихся на 1 см длины проводника — эту величину называют плотностью положительного электрического заряда, — равно количеству электронов, приходящихся на 1 см длины проводника — плотности отрицательных зарядов. Сумма этих плотностей равна нулю, если, конечно, при сложении плотность отрицательных зарядов брать со знаком минус.

Если вы стоите на некотором расстоянии от проводника, то для вас он полностью электрически нейтральный. Нейтрален каждый его отдельный сантиметр, ней-

тральны они все, вместе взятые. Не существует такого опыта, даже мысленного, с помощью которого вы могли бы обнаружить отдельные электрические заряды в проводнике.

Пусть теперь по проводнику течет ток. Положительные заряды ядер остаются неподвижными, а электроны движутся с некоторой заданной скоростью, зависящей в данном случае от силы тока. Изменится ли что-нибудь для наблюдателя, находящегося на некотором расстоянии от проводника? Легко сообразить, что ничего не изменится. Здесь полная аналогия с потоком воды в замкнутом желобе. В отрезок проводника длиной 1 см поступает ровно столько электронов, сколько его покидает. Количество электронов, находящихся в пределах этого сантиметра, остается постоянным независимо от того, течет ток или нет, и равным количеству положительных зарядов. Проводник с током представляется неподвижному наблюдателю таким же электрически нейтральным, как и проводник, по которому ток не течет.

Если поблизости от проводника с током разместить неподвижный относительно проводника электрический заряд, неважно, положительный или отрицательный, он тоже «не почувствует» никаких зарядов в проводнике. Для такого электрического заряда проводник как бы отсутствует: есть он, нет его — никакой разницы.

Представьте себе, наконец, что вы перемещаетесь относительно проводника с током. Скажем для простоты, что вы двигаетесь в ту же сторону, что и электроны, и с той же скоростью. Вы видите неподвижные электроны и положительные заряды, которые для вас теперь перемещаются в сторону, противоположную вашему движению. Изменилось ли что-нибудь? Для электронов ничего не изменилось — они неподвижны. А для положительных зарядов изменилось многое. То, что в случае неподвижного проводника было 1 см, теперь стало короче, скажем 8 мм. Согласно законам специальной теории относительности движущиеся линейки становятся короче. Наоборот, в том, что вам представляется сантиметром (ведь вы не обязаны знать, перемещаетесь вы относительно проводника или нет), на самом деле укладывается более длинный отрезок проводника, скажем 12 мм. Но в более длинном отрезке проводника помещается больше положительных зарядов. И вот вывод: в вашем сантиметре, т. е. в том, что представляется вам сантиметром

длины проводника, электронов укладывается столько же, что и в том случае, когда вы были относительно проводника неподвижными, а положительных зарядов больше.

Когда вы двигаетесь относительно проводника с током, он представляется вам заряженным положительно. То же самое «чувствует» электрический заряд. Если он движется относительно проводника с током, то для него проводник представляется заряженным, а значит, окруженным электрическим полем. Заряд реагирует на это поле. Например, если заряд отрицательный и движется в ту же сторону, что и электроны в проводнике, он притягивается к проводнику.

Все сказанное справедливо и для положительных зарядов, если бы они имели возможность двигаться. Это наблюдалось на опытах уже давным-давно. Если два проводника расположены параллельно друг другу и электрические токи по ним текут в одинаковых направлениях, то такие проводники притягиваются. Наоборот, если токи в параллельных проводниках текут в противоположных направлениях, то такие проводники отталкиваются.

Вот и разгадка. Вагон, движущийся относительно проводника с током, притягивается к нему и не падает. Напротив, вагон, неподвижный относительно проводника, не будет притягиваться и коснется земли. Собственно, это от него и требуется. Зачем удерживать на магнитной подвеске вагон, который никуда не движется? Важно, что все зависит от движения вагона относительно проводника. А что там видит наблюдатель и где он при этом находится, совершенно несущественно для взаимодействия проводника и вагона.

Один из выводов теории относительности состоит в том, что никакого магнитного поля на самом деле не существует. То, что называли этим словом, на самом деле представляет собой электрическое поле, возникающее из-за нарушения взаимной пространственной компенсации положительных и отрицательных зарядов. Подобный взгляд объясняет многое. Прежде всего то, почему у магнитного поля нет и не может быть источника.

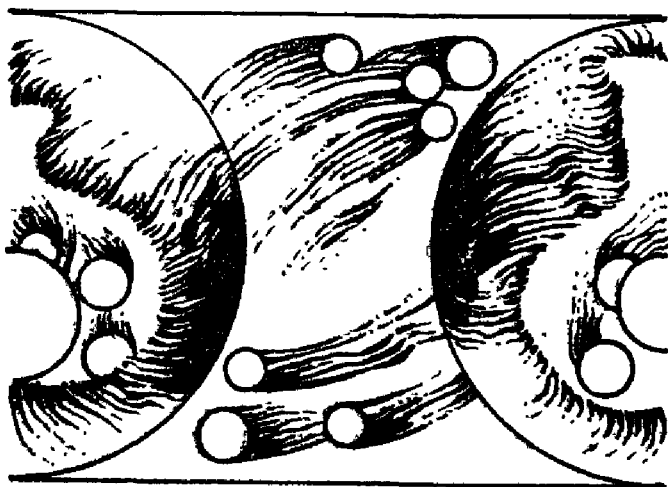
Не следует только думать, что новая точка зрения содержит в себе ответы на все вопросы. Ничего подобного! Мы знаем, например, что изменяющееся магнитное поле может порождать поле электрическое, а оно, в свою очередь, порождает магнитное поле. Все это происходит

без каких бы то ни было зарядов, как движущихся, так и неподвижных. Все, что мы можем в настоящее время, это задуматься над некоторыми вещами. Например, над тем, стоит ли продолжать населять пространство неважно чем: силовыми линиями, эфиром или квантами? Населяя пространство, мы тем самым молчаливо соглашаемся, что пространство существует само по себе, независимо от того, чем мы его населяем. А ведь сколько существует непреложных фактов, свидетельствующих об обратном! Пространство искривляется вблизи тяготеющих масс. Пространство сокращается и растягивается в различных системах отсчета. Есть очень много данных за то, что пространство расширяется вместе с нашей расширяющейся Вселенной, а вне Вселенной нет и пространства.

Подождем, однако, делать выводы — нам еще есть о чем рассказать. А пока констатируем, что электрическая энергия — это энергия, распределенная в пространстве. Пространство, заполненное электрической энергией, называется электрическим (можно по-прежнему называть его электромагнитным) полем. Свойства электрического поля мы постарались по возможности подробно описать в этой главе. Плодотворной и весьма удобной оказывается теория, описывающая электрическое поле как состоящее из отдельных частиц — квантов. Эта теория получила название квантовой электродинамики. В квантовой электродинамике сейчас не осталось почти никаких противоречий, кроме отмеченных выше трудностей. Но серьезный разговор о квантах нам предстоит. Заметим в заключение, что в этой главе мы ввели еще один закон сохранения — закон сохранения электрического заряда.

ГЛАВА 4

Химическая энергия



Огонь

«Когда мне было лет около пяти и отец мой однажды сидел в одном подвальчике, в каковом учинили стирку и остались ярко гореть дубовые дрова, Джованни, с виолой в руках, играл и пел один у огня. Было очень холодно; глядя в огонь, он вдруг увидел посреди наиболее жаркого пламени маленького зверька, вроде ящерицы, каковой резвился в этом наиболее сильном пламени. Сразу поняв, что это такое, он велел позвать мою сестренку и меня и, показав его нам, малышам, дал мне великую затрещину, от каковой я весьма отчаянно принялся плакать. Он, ласково меня успокоив, сказал мне так: «Сынок мой дорогой, я тебя бью не потому, чтобы ты сделал что-нибудь дурное, а только для того, чтобы ты запомнил, что эта вот ящерица, которую ты видишь в огне, это саламандра, каковую еще никто не видел, из тех, о ком доподлинно известно». И он меня поцеловал и дал мне несколько кватрино».

Этот эпизод рассказал знаменитый флорентийский скульптор и золотых дел мастер Бенвенуто Челлини в своей биографии. Огонь! Средневековые алхимики считали, что огонь — одна из четырех стихий, из которых

состоит мироздание. Огонь — поток раскаленных газов, возникающий в результате преобразования химической энергии в энергию тепловую. Процесс подобного преобразования называют также горением. При горении сжигается топливо. Общеизвестно знаменитое высказывание Д. И. Менделеева о том, что топить нефтью — это все равно что топить ассигнациями. Сжигать любое топливо равносильно сжиганию ассигнаций, потому что запасы топлива или вообще невосполнимы (нефть, уголь), или восполняются очень медленно (дрова). Тем не менее современное человечество большую часть своих энергетических потребностей удовлетворяет за счет запасов химической энергии.

Что же такое химическая энергия? Ответить на этот вопрос, значит, по существу объяснить, почему мир именно таков, каков он есть, и нам придется ненадолго обратиться к истории физики.

Резерфорд и Бор

К концу прошлого века ни у кого из серьезных физиков не оставалось сомнений в том, что все тела состоят из атомов, а все разнообразие окружающего нас мира обеспечивается различными сочетаниями простейших веществ — элементов. Элементы заняли подобающие им места в периодической таблице Менделеева. Менделеев установил также, что химические и физические свойства элементов изменяются периодически по мере возрастания их атомного веса. В 1897 году Дж. Дж. Томсоном был открыт электрон, и сразу стало ясно, что электроны входят в состав всех атомов. Однако считалось, что атомы представляют собой твердые шарики. Тот же Томсон предложил свою «кексовую» модель строения атома, согласно которой электроны в атоме вкраплены в положительно заряженное вещество, примерно как изюминки в тесте.

В 1909 году английский физик Эрнест Резерфорд, работая в Манчестерской лаборатории, закончил свой исторический цикл экспериментов. Тонкие металлические листочки он облучал альфа-частицами, получающимися при распаде радия. Как и следовало ожидать, большинство альфа-частиц беспрепятственно проходило сквозь листочки. Но главное не это. Отдельные альфа-частицы все же отскакивали от листочка и поворачивали вспять.

О чем свидетельствовал этот факт? Внутри металлического листочка есть нечто, отталкивающее от себя альфа-частицы. Это нечто, по всей вероятности, заряжено положительно, потому что альфа-частицы заряжены положительно, а отталкиваются одноименные заряды. Это нечто должно быть относительно невелико, потому что из общего потока альфа-частиц лишь ничтожная их часть испытывает отталкивание.

Так появилась планетарная модель атома Э. Резерфорда. Положительно заряженное нечто было объявлено атомным ядром. Из того, что ядро относительно невелико (сейчас известно, что размеры ядра составляют примерно одну стотысячную долю от расстояния между ядрами), следовало, что электроны не вкраплены в ядро, как полагал Томсон, а вращаются вокруг него точно так же, как планеты вращаются вокруг Солнца.

Но тут возникло непреодолимое препятствие. Согласно всему тому, что ученые знали об электричестве, заряд, движущийся с ускорением, должен излучать электромагнитные волны, а значит, постепенно терять свою энергию. Движение по окружности или по эллипсу — это движение с ускорением. Электрон в планетарной модели Резерфорда обязан был излучать электромагнитные волны и постепенно, теряя энергию, падать на ядро. Ничего подобного не наблюдалось. Это побудило Резерфорда к собственной модели относиться с известной долей недоверия.

Летом 1912 года Нильс Бор, молодой сотрудник Резерфорда, уезжал домой в Копенгаген на собственную свадьбу с Маргарет Норвунд. Перед самым отъездом на семи листах, подклеенных друг к другу, он составил памятную записку, в которой делился с учителем своими идеями. Записка не понадобилась, потому что перед отъездом Бору предоставилась возможность поговорить с Резерфордом и лично сообщить ему свои соображения. Но памятная записка сохранилась в архиве Бора. В ней, в частности, Бор указал, что место, занимаемое каждым элементом в таблице Менделеева, определяется не атомным весом, как считалось тогда, а зарядом ядра. Элементы с различными атомными весами могут занимать одну и ту же клетку таблицы Менделеева, если заряды их ядер одинаковые. Много позже подобные элементы получили название изотопов, т. е. занимающих одно и то же место. Не атомный вес, а электрический заряд

ядра ответствен за физико-химические свойства элементов, а следовательно, за все разнообразие мира.

В той же записке, правда не совсем еще в явной форме, Бор высказал мысль о том, что среди всех возможных орбит электронов в ядре существуют особые стационарные орбиты, находясь на которых электрон не излучает энергию. Это такие орбиты, при движении по которым момент количества движения электрона равен целому числу, помноженному на постоянную Планка. Эти числа получили название квантовых чисел.

В 1913 году в трех статьях Бор оформил свои предположения и сформулировал количественную теорию. Теория Бора объясняла многие из накопившихся к тому времени экспериментальных фактов, в том числе распределение спектральных линий. В результате в физике создалось поистине невыносимое положение. С одной стороны, многочисленные экспериментальные подтверждения боровской теории заставляли относиться к ней серьезно. С другой стороны, оставался все тот же проклятый вопрос: почему не излучает электрон, движущийся с ускорением, хотя бы и по избранным, стационарным орбитам? Бор лишь провозгласил правило, но не дал ему никакого объяснения.

Бор утверждал, например, что электрон излучает кванты электромагнитной энергии, перескакивая с орбиты на орбиту. Но тогда непонятно, откуда электрон, начиная свой переход, знает, на какой орбите он остановится? Ведь квант электромагнитной энергии электрон излучает сразу, целиком. Отзвуки этих недоумений сохранились до настоящего времени.

Полтора десятилетия, следовавшие за первыми публикациями Бора, получили в истории науки название эпохи бури и натиска. Была предложена не одна, а две теории: матричная механика В. Гейзенберга и волновая механика Э. Шредингера. В дальнейшем, правда, оказалось, что это одна и та же теория, только описанная в разных математических терминах. Создание реальной модели атома потребовало полного отказа от привычных представлений. Ответы на большинство вопросов были получены лишь тогда, когда в 1927 году Вернер Гейзенберг сформулировал свое знаменитое соотношение неопределенностей.

Мы повторяем эти общеизвестные факты для того, чтобы выделить интересную особенность. До самой по-

следней возможности ученые цеплялись за «твердый мир», состоящий из шариков-электронов и твердых атомных ядер.

Атомы

Что такое атом в соответствии с современными воззрениями? Как и во времена Резерфорда, считается, что атом состоит из положительно заряженного ядра и некоторого количества электронов. Электроны не падают на ядро потому, что электрон вообще не может находиться в определенном месте, будь то ядро или что-нибудь другое. Это объясняется тем, что электрон вовсе не твердый шарик. Любые попытки нарисовать портрет электрона, пользуясь привычными нам образами, усугубляют непонимание. Остается еще раз повторить, что мир не таков, каким мы его себе представляем. Наши органы чувств, в том числе и вооруженные физическими приборами, в большинстве случаев воспринимают не реальную действительность, а усредненные эффекты многочисленных воздействий.

Тем не менее, не умея нарисовать портрет атома, можно с достаточной степенью достоверности описать его количественно. В простейшем атоме водорода, содержащем один электрон, этот электрон занимает объем в полном соответствии с соотношением неопределенностей. При этом электрон обладает совершенно определенным количеством движения. Действительно, если бы количество движения равнялось нулю (т. е. не содержало бы неопределенностей), то объем, занимаемый электроном, должен был бы равняться бесконечности. Наоборот, если бы равнялся нулю объем, то в бесконечность обращалось бы количество движения электрона.

Итак, из соотношения неопределенностей следует определенная величина объема, занимаемого электроном, и определенная величина количества движения. Обладая количеством движения, электрон, а точнее атом, поскольку электрон принадлежит атому со всем своим «имуществом», должен иметь определенный запас кинетической энергии. Минимальным запасом он обладает всегда, даже при температуре абсолютного нуля — этот запас и есть неотъемлемое свойство электрона как такового. Мы снова пришли к уже знакомой нам формулировке основных законов современной физики: можно все,

кроме того, что нельзя. В данном случае роль запрета играет соотношение неопределенностей. Произведение из неопределенности в количестве движения на неопределенность местоположения не может быть меньше постоянной Планка.

Кроме основного состояния, электрон, а точнее — весь атом, может принимать и другие, строго определенные энергетические состояния. Атом способен переходить из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией. При каждом таком переходе излучается порция электромагнитной энергии.

Так обстоит дело с атомом водорода. Атомы других элементов, содержащих более одного электрона, подчиняются еще одному запрету, получившему название принципа запрета Паули: в атоме не может быть двух электронов, находящихся в точно одинаковых состояниях. Если состояние с наименьшей энергией уже занято одним электроном, то второй электрон в соответствии с принципом Паули должен занимать другое состояние, характеризующееся более высокой энергией. То же самое справедливо для третьего, четвертого электронов и т. д.

Атом любого вещества обладает строго определенной электронной структурой, подчиняющейся двум основным законам: соотношению неопределенностей и принципу Паули. Большое значение имеют также и спины электронов. В каждом состоянии атом в целом обладает запасом кинетической энергии, причем минимальная величина этого запаса устанавливается опять-таки соотношением неопределенностей и принципом Паули. Пока атом остается атомом, т. е. пока он не потерял ни одного из своих электронов, запас его кинетической энергии не может быть меньше некоторой минимальной величины. Таким образом, каждый атом представляет собой кладовую энергии, которая и называется химической.

Итак, химическая энергия — это опять-таки кинетическая энергия движения, кинетическая энергия движущихся электронов. Однако в отличие от того, с чем мы сталкивались до сих пор, значение химической энергии каждого атома строго определено.

Молекула

Не столкнулись ли мы снова с парадоксальной ситуацией? Окруженные всевозможными атомами, мы тем

самым окружены поистине неисчерпаемыми запасами химической энергии. Но как ее заполучить? Мы сами выяснили, что энергия атома не может оказаться меньше своего значения в основном состоянии. Но если она не может оказаться меньше, то атом не может отдать даже маленькой части своей энергии. А коли так, спрашивается, какая нам польза от того, что эти запасы существуют? Атом отдает часть энергии, переходя из возбужденного состояния в основное. Но для этого его надо сначала возбудить, т. е. затратить ровно столько энергии, сколько потом может быть получено.

Все это правильно. Атомы как таковые действительно являются кладовыми энергии, спрятанными за семью замками. Существует ли способ разомкнуть эти замки? Да, для этого нужно, чтобы атомы объединились в молекулу. Молекула — более сложное образование, чем отдельный атом. Часть электронов атомов объединяется и становится общей для всей молекулы. При этом, естественно, изменяется электронная структура и возникают новые разрешенные энергетические уровни. Возможно одно из двух: либо суммарная энергия электронов в основном состоянии молекулы будет выше, чем сумма энергий атомов, составляющих молекулу, либо, наоборот, суммарная энергия электронов в основном состоянии молекулы будет ниже, чем сумма энергий атомов, составляющих молекулу.

Объединение атомов в молекулу, которому, возможно, предшествовало разделение других молекул на атомы, называется химической реакцией. Химические реакции бывают двух типов: эндотермические и экзотермические. Эндотермические реакции протекают в том случае, если извне поступает определенное количество тепла, т. е. энергии. Образовавшиеся в результате эндотермической реакции молекулы обладают энергией основных состояний большей, чем суммарная энергия основных состояний молекул и атомов реагентов.

Экзотермические реакции протекают с выделением тепла. Количество выделенного тепла равно разности между суммарной энергией основных состояний молекул и атомов исходных веществ и энергией основного состояния молекулы продукта реакции. Смотрите, как интересно получается! Есть возможность почерпнуть не всю энергию атома, а некоторую, как правило, малую ее часть, представляющую собой разность двух значений.

В конце XVIII века житель итальянского города Болонья профессор Луиджи Гальвани совершил, как потом выяснилось, огромной важности открытие, и помогла ему в этом лягушачья лапка. Чего только не рассказывают о том, как все происходило. Одни говорят, что, будучи медиком, Гальвани препарировал лягушек исключительно в целях научного познания. Согласно другой версии профессор любил суп из лягушачьих лапок и сам его стряпал. Так или иначе, но лягушачья лапа в этой истории, несомненно, присутствовала.

Дальше опять идут разночтения. Одни утверждают, что Гальвани экспериментировал с электрической машиной и заметил, что всякий раз, когда в машине проскакивает искра, лягушачья лапка подергивается. По другой версии лягушачья лапка висела на медном крючке, укрепленном на железных перилах балкона. Она покачивалась от ветра и дергалась всякий раз, когда касалась железных перил. Возможно, Гальвани наблюдал и то и другое. Но вывод он сделал определенный: существует особое, животное электричество. Оно и заставляет подергиваться лапку.

Об опытах Гальвани узнал другой итальянец — Алессандро Вольт. Вольт в отличие от Гальвани с восемнадцати лет изучал различные электрические явления. Гипотеза о животном электричестве показалась ему малоправдоподобной. Электричество возникает при соединении между собой двух различных металлов, утверждал Вольт. В доказательство этого утверждения Вольт построил прибор: несколько сложенных вместе медных и цинковых пластинок, между которыми проложены кусочки материи, смоченной водой. Этот прибор, его называли Вольтов столб, позволял получать электрический ток.

Гальвани, однако, продолжал настаивать на своем, он так и умер, не закончив спора. Сегодня в любом учебнике физики можно прочитать, что в споре между Гальвани и Вольта прав был Вольт: электричество возникает при соединении двух разнородных металлов. Вольтов столб есть не что иное, как первая в мире электрическая батарейка. Но не станем спешить с выводами. Заметим только, что Гальвани в споре с Вольта

говорил не об электричестве вообще, а о том конкретном электричестве, которое заставляет подергиваться лягушачью лапку.

Твердое тело

Тем, что окружающий нас мир таков, каков он есть, мы обязаны свойствам электрона. Конечно, ядра тоже участвуют в построении картины мира, но они создают как бы сцену, на которой, образно говоря, электроны разыгрывают свои спектакли. Достаточно изменить хотя бы что-нибудь, например разрешить электрону занимать в атоме любые энергетические уровни, как все электроны рано или поздно упадут на соответствующие ядра и мир станет выглядеть невообразимо иначе. К счастью, такого не происходит, и мы продолжаем жить в окружении твердых, жидких и газообразных тел. Сейчас нас интересуют твердые тела, еще точнее, кристаллические твердые тела.

В кристаллическом твердом теле, или, короче, кристалле, электроны всех атомов делятся как бы на две группы: сильно связанные с ядром и не сильно связанные. Последние называют также валентными. Атомные ядра вместе с сильно связанными электронами располагаются на одинаковых расстояниях друг от друга и образуют регулярную периодическую структуру — кристаллическую решетку. Электромагнитные поля всех валентных электронов и всех атомных остатков складываются, образуя общее электромагнитное поле кристалла. Поле это чрезвычайно сложное, оно обладает периодической структурой. Предположим, что вам удалось измерить, скажем, напряженность магнитного поля в некоторой точке внутри кристалла. Тем самым вы узнали величину и направление векторов напряженности магнитного поля во всех точках внутри кристалла, расположенных на одной прямой и на расстояниях друг от друга, кратных постоянной кристаллической решетки. У большинства кристаллов постоянная кристаллической решетки (она, кстати сказать, различна в различных направлениях) имеет порядок 10^{-8} см.

Радиусы атомных ядер (мы уже говорили об этом) имеют порядок 10^{-13} см, а расстояния между атомными ядрами — 10^{-8} см. Переходя к привычным представлениям, можно сказать, что кристалл выглядит так же,

как если бы шарики радиусом, скажем, 1 см располагались на расстояниях друг от друга порядка 1 км. Стоя возле одного такого шарика, вы просто не видели бы всех остальных.

Представляете себе только что нарисованную картину? Кристалл — пространство, заполненное электромагнитным полем, и ничтожную долю этого пространства занимают ядра. Практически все свойства кристалла, такие, как его твердость, упругость, электропроводность, теплопроводность, температура плавления и др., на самом деле представляют собой свойства электромагнитного поля. Масса кристалла почти целиком определяется массой атомных ядер, а некоторые оптические свойства — конфигурацией и постоянными кристаллической решетки.

Валентные электроны в кристалле становятся общими для всего кристалла. В атоме еще можно указать некоторую область, занимаемую тем или иным электроном, а в кристалле для всех валентных электронов такой областью является весь объем кристалла. Валентные электроны находятся в электромагнитном поле кристалла и вносят свой вклад в свойства этого поля. Единственной причиной, удерживающей атомные остатки на своих местах в узлах кристаллической решетки, является все то же электромагнитное поле.

В кристалле, как и в атоме, электроны принимают только некоторые разрешенные значения (уровни) энергии. Уровни группируются в зоны. Каждому одиночному разрешенному уровню электрона в атоме соответствует в кристалле целая разрешенная зона, заполненная уровнями. Каковы бы ни были размеры кристалла, количество уровней в каждой зоне равно количеству электронов, относящихся к этой зоне, поделенному пополам. Для кристалла также справедлив принцип Паули: каждый уровень может быть занят не более чем двумя электронами при условии, что их спины направлены в противоположные стороны.

Валентным электронам соответствует валентная разрешенная зона. Большим по сравнению с уровнями валентной зоны значениям энергии соответствуют одна или несколько свободных зон. При температуре абсолютного нуля все уровни валентной зоны заняты электронами, а все уровни свободной зоны свободны. Валентная и свободная зоны разделены промежутком запрещенной зо-

ны. В пределах запрещенной зоны нет ни одного значения энергии, которым мог бы обладать электрон.

В зависимости от ширины запрещенной зоны кристаллические твердые тела делятся на три класса. Если ширина запрещенной зоны превышает примерно 3 эв, то такие тела представляют собой изоляторы, или диэлектрики. При отсутствии запрещенной зоны, когда валентная и свободная зоны пересекаются, мы имеем дело с проводниками. Промежуточный случай, когда ширина запрещенной зоны составляет примерно от 0,5 до 3 эв, дают полупроводники.

В обычных условиях в диэлектриках невозможно никакое упорядоченное движение электронов, они не проводят электрического тока. Почему так происходит? Про каждый валентный электрон нельзя сказать, что он принадлежит какому-то конкретному атому. Все валентные электроны в кристалле общие, и кристалл представляет собой как бы одну большую молекулу. Электроны в кристалле находятся в непрерывном движении. Правда, движутся они не совсем так, как в нашем представлении перемещаются маленькие шарики или молекулы в газе.

Применительно к электрону в кристалле «движется» означает одно: объект обладает кинетической энергией, или, что то же самое, окружен магнитным полем. Обладая кинетической энергией, электрон обязательно должен обладать количеством движения. Зная величину и направление напряженностей магнитного и электрического полей, можно определить величину и направление количества движения (количество движения — величина векторная). Вы хорошо прочувствовали, что для электрона в кристалле двигаться — значит быть окруженным, кроме электрического, еще и магнитным полем? Движение электронов необходимо для существования твердого тела. Между атомными ядрами и неподвижными электронами действовали бы лишь силы электростатического притяжения, и электроны упали бы на ядра. Все точно так, как и в атоме.

Два электрона могут обмениваться своими уровнями. В таких случаях говорят о «столкновении» электронов. Не подумайте, что при столкновении электроны касаются друг друга — такое просто невозможно. Применительно к электронам в кристалле «столкнуться» означает обмениваться занимаемыми уровнями. Естественно, при столкновении соблюдается закон сохранения количества

движения, т. е. сумма (векторная) количеств движения двух электронов после столкновения равна сумме (векторной) их количеств движения до столкновения. Именно из-за возможности столкновений (обмен занимаемыми уровнями) создается впечатление хаотичности движения электронов в кристалле.

В каком-то дополнительном движении, например упорядоченном движении под действием внешнего электрического поля (электрический ток), электроны кристалла участвуют в том случае, если имеются свободные, более высокие энергетические уровни. Когда все уровни в валентной зоне заняты, никакое дополнительное упорядоченное движение электронов невозможно. Что удерживает электроны? В привычном для нас смысле этого слова они абсолютно свободны, но крепче, чем стальные канаты, удерживает электроны подчиненность принципу Паули, согласно которому два электрона ни при каких условиях не могут находиться в одном и том же энергетическом состоянии, т. е. занимать один и тот же энергетический уровень.

По какой-либо причине, например из-за увеличения температуры, отдельный валентный электрон приобретает порцию дополнительной энергии, большую ширины запрещенной зоны. Тогда электрон переходит в свободную зону, занимая там один из свободных уровней. В свободной зоне электроны могут изменять свою энергию — свободных уровней там достаточно — и участвовать в любых движениях, в том числе в упорядоченном движении по переносу электрического тока. При комнатной температуре у проводников в свободной зоне всегда есть какое-то количество электронов. Эти электроны практически не взаимодействуют с валентными электронами.

Электроны в кристалле связаны между собой, точнее, каждый электрон связан с окружающим его электромагнитным полем. Эта связь определяется принципом Паули. Переходя в другую энергетическую зону, электрон освобождается от действия принципа Паули. Находясь в свободной зоне, электроны почти столь же свободны (в смысле возможности изменять свою энергию), как если бы они находились в вакууме. Все это, однако, справедливо до тех пор, пока электрон находится в пределах кристалла.

Кристалл имеет весьма сложное электромагнитное поле с периодической структурой. Во всех случаях, не

требующих учета массы, на атомные ядра в кристалле можно просто не обращать внимания. В электромагнитном поле распределены электроны. Бессмысленно говорить о местоположении отдельного электрона, но где бы он ни находился, электрон оказывает влияние сразу на все поле. Если каким-то образом из кристалла извлечь один электрон, весь кристалл, именно весь, а не какой-то его участок, приобретет свойства положительно заряженного тела.

Кристалл представляет собой как бы трехэтажный дом. В первом, самом нижнем этаже расселены сильно связанные электроны атомных остатков. Они почти не принимают участия в «событиях», происходящих в кристалле. Причем слово «расселены» применительно к электронам — это не авторская вольность, а научный термин. Второй этаж соответствует валентной зоне. Когда этот этаж заселен полностью, никакое упорядоченное движение в кристалле невозможно. Третий, верхний этаж соответствует свободной зоне. Живущие здесь электроны могут вытворять все что угодно. И знаете, что самое интересное? Порядки на каждом из этажей ни в коей мере не зависят от того, что творится на других этажах.

Металлы

Что представляют собой металлы? Большинство из них — кристаллические твердые тела, у которых запрещенная зона отсутствует, а свободная зона пересекается с валентной. Валентные электроны металлов могут участвовать в любых упорядоченных движениях, поэтому металлы, как правило, хорошие проводники электрического тока. Но нас интересует другое. Возвращаясь к аналогии с трехэтажным домом, скажем, что у металлов, как и у других твердых тел, нижний, энергетический этаж заселен полностью. Поэтому электроны, которым не досталась «квартира» в нижнем этаже, селятся на втором и третьем (у металлов они объединены) этажах и, следовательно, обладают высокими по сравнению с нижним этажом значениями энергии.

Так происходит всегда, даже когда температура металла равна абсолютному нулю. Наличие в металлах, как, впрочем, в любых телах, относительно энергичных электронов определяется не тем, что кто-то (или

что-то) специально сообщил им дополнительную энергию, а фундаментальным законом природы, получившим название принципа Паули. Если электрон не успел занять квартиру в нижнем этаже, ему не остается ничего другого, как приобрести у соседей дополнительную энергию и разместиться на втором этаже, а то и на третьем. Мы уже говорили, что валентные и свободные электроны любого тела и при любых условиях, в том числе и при температуре абсолютного нуля, обладают неким запасом энергии, этот запас есть не что иное, как химическая энергия данного вещества.

Среднее значение энергии электронов — жителей верхних этажей — называется электрохимическим потенциалом. Как валентная, так и свободная энергетическая зона получается в результате расщепления одного энергетического уровня данного атома. У разных веществ эти уровни различны, различны положения на оси энергий валентных и свободных зон, различны значения электрохимических потенциалов.

Есть контакт!

Крепко прижмите друг к другу два стержня из разных металлов. Предположим, у левого стержня электрохимический потенциал выше, у правого — ниже. Электроны справа и электроны слева обладают кинетической энергией, т. е. находятся в непрерывном движении, причем движутся беспорядочно. После того как вы прижали стержни, часть электронов справа перейдет в левый стержень (ведь электроны перемещаются во все стороны), а часть электронов с левого стержня — в правый. Электроны с левого стержня обладают большей средней кинетической энергией, поэтому они двигаются быстрее, и в единицу времени слева направо перейдет больше электронов, чем справа налево. Постепенно электроны станут накапливаться в правом стержне.

Если бы электроны можно было уподобить шарикам, переходящим с места на место, наша задача неизмеримо облегчилась бы. К сожалению, говоря «электрон движется», мы оказываемся ничуть не ближе к реальности, чем когда говорим «электрон живет в верхнем этаже энергетического дома». На самом деле все сложнее (а может быть, проще!). Электрон, который, по-нашему, движется в свободной зоне, может внезапно исчезнуть, «про-

валиться» в валентную зону. Такое явление называют рекомбинацией, и есть в нем нечто примечательное. Если имеется хоть какая-то возможность говорить о пространственном положении электрона, то при рекомбинации оно сохраняется неизменным. А с точки зрения интересующих нас процессов электрон исчезает.

Попытаемся сказать иначе. Электроны в свободной зоне представляют своеобразный газ. Этот газ занимает некоторый объем (объем взятого образца) и создает определенное давление. Произведение из давления на объем пропорционально «температуре» электронного газа. Температура, в свою очередь, пропорциональна его средней кинетической энергии.

Следует признаться, что слова «объем», «давление», «температура» отражают реальность в той же степени, как и слова «поселился» и «живет» по отношению к электрону. Тем не менее продолжим наш опыт со стержнями. Электрохимический потенциал, а значит, средняя кинетическая энергия, температура и давление, слева выше, чем справа. Под влиянием более высокого давления граница, отделяющая левый стержень от правого, как бы смещается вправо. А результат? В правом стержне накапливается какое-то количество избыточных электронов, точнее, избыточный отрицательный заряд.

Наконец, третье объяснение. Вся окружающая нас природа подчиняется фундаментальному закону, известному под названием второго начала термодинамики: во всякой изолированной физической системе обязательно возникают процессы, направленные в сторону установления равновесия (если таковое еще не достигнуто). Соединив вместе два металлических стержня, вы получили неравновесную систему: потенциал слева выше, чем потенциал справа. Конфигурация электромагнитного поля (она одна изменяется на самом деле) меняется таким образом, чтобы восстановилось равновесие. Достичь этого можно единственным способом — создавая разность электрических потенциалов, равную по величине и противоположную по знаку исходной разности электрохимических потенциалов.

Это и происходит в нашем опыте. По обе стороны поверхности соприкосновения двух металлов возникает разность электрических потенциалов (электрическое напряжение), которая называется контактной разностью потенциалов, или гальвани-потенциалом.

Отчего она подергивалась?

Наличие гальвани-потенциала можно установить с помощью простого опыта. На стержне электроскопа укрепляют металлический диск, затем тонкую изолирующую прокладку и второй диск из другого металла, снабженный ручкой. Диски соединяют между собой проводочкой, например из первого металла. Составленный из двух дисков конденсатор заряжается до величины контактной разности потенциалов. Заряд сохраняется в конденсаторе и после того, как проводочку убирают. Однако контактная разность потенциалов очень мала, поэтому листочки электроскопа заметно не разойдутся.

А если поднять за ручку верхний диск? Расстояние между дисками увеличится, емкость конденсатора уменьшится. При неизменном заряде это повлечет за собой увеличение напряжения между обкладками. Листочки электроскопа разойдутся. Сейчас доказано, что в подобном опыте действует много необычных факторов. Истинную величину контактной разности потенциалов измерить невозможно — ее пока не умеют и вычислить.

Похоже, что наш рассказ, которому вполне подошло бы заглавие «Тайна лягушачьей лапки», подходит к концу. Мы не только подтвердили тот факт, что в месте соединения двух металлов возникает электрическое напряжение, но и объяснили, почему так получается. Пришлось немного погрузиться в глубины физики твердого тела, но, как говорил А. Эйнштейн: «Мы хотим не только знать, как устроена природа (и как происходят природные явления), но по возможности достичь цели, может быть, утопической и дерзкой на вид, — узнать, почему природа является именно такой, а не другой. В этом ученые находят наивысшее удовлетворение. В этом состоит и прометеевский элемент научного творчества».

Значит, Вольта оказался прав, а Гальвани — нет? Что ж, конец истории? Нет, не станем торопиться. Для того чтобы произошло какое-то событие (в том числе и подергивание лягушачьей лапки), необходимо затратить хоть ничтожное, но все же конечное количество энергии. В электрических цепях энергия пропорциональна произведению величины напряжения на силу тока. Следовательно, одного напряжения недостаточно, нужно еще, чтобы в цепи протекал ток.

Составьте последовательную электрическую цепь из

металла *А*, металла *Б* и какого-нибудь проводника *В*. Пусть металл *А* имеет электрохимический потенциал *а*, металл *Б* — электрохимический потенциал *б*, проводник *В* — электрохимический потенциал *в*. Проводник *В* — совсем не обязательно металл, поскольку электрохимическим потенциалом обладает любое вещество.

Посчитайте теперь сумму гальвани-потенциалов. На границе между металлами *А* и *Б* он равен *а* минус *б*. Пойдем дальше вдоль последовательной цепи. На границе между *Б* и *В* гальвани-потенциал равен *б* минус *в* и на границе между *В* и *А* он равен *в* минус *а*. А в сумме? В сумме нуль. Такой же результат получится, сколько бы проводников вы ни брали и какие бы сложные разветвленные цепи из них ни составляли.

Величина электрохимического потенциала не зависит от того, что происходит с веществом. Она зависит от распределения энергетических уровней, т. е. в конечном итоге от структуры атома. Если бы разность электрохимических потенциалов могла служить причиной протекания тока, такой ток протекал бы всегда и получился бы вечный двигатель. Нет, не контактная разность потенциалов была причиной подергивания лягушачьей лапки в опытах Гальвани! Понадобилось еще что-то. И поскольку ничего, кроме лапки, медного крюка и железных перил, в опыте не было, это «еще что-то» должно таиться в самой лягушачьей лапке.

Жидкости

Мы потратили много времени на изучение физических законов, обидно теперь использовать приобретенные знания только на разбирательство спора Гальвани с Вольта. Посмотрим, как в свете наших знаний выглядят жидкости.

Всякая жидкость — сложное электромагнитное поле, в которое то здесь, то там вкраплены атомные ядра и электроны. Чем отличаются жидкости от кристаллов? Отличий два. Первое состоит в том, что жидкости не обладают периодической и вообще никакой постоянной структурой. Структура жидкости зависит от многих причин, в том числе от формы сосуда, куда жидкость налита. Второе отличие в том, что электроны в жидкости не являются общими, а в той или иной степени связаны с

атомами и молекулами, правда, не обязательно со своими.

Среди прочих жидкостей для нас интереснее всего растворы, т. е. когда молекулы какого-нибудь вещества перемешаны с молекулами воды. Для водных растворов весьма характерно явление диссоциации, когда некоторые молекулы растворенного вещества распадаются на отдельные части — ионы. Ион — это осколок молекулы, заряженный положительно или отрицательно. Например, молекула поваренной соли NaCl распадается (диссоциирует) в растворе на положительно заряженный ион Na^+ и отрицательно заряженный ион Cl^- .

В чем различие между раствором поваренной соли и кристаллом той же поваренной соли? В кристалле атомы натрия и атомы хлора отделены друг от друга, они расположены в чередующихся узлах кристаллической решетки. Но при этом и атомы натрия и атомы хлора не имеют своих валентных электронов. При образовании кристалла они потеряли их и превратились в положительно заряженные ионы. Валентные электроны всех атомов объединились и создали общее электромагнитное поле, удерживающее систему в равновесии.

В растворе атомы натрия и хлора также разделены. Но если атом натрия теряет свой единственный валентный электрон, то атом хлора приобретает дополнительный электрон. В растворе каждый электрон принадлежит какому-нибудь атому, энергетические зоны отсутствуют, а энергия каждого электрона определяется одним из разрешенных уровней атома.

Но почему так происходит? Почему одни и те же атомы ведут себя по-разному в кристалле и в растворе? Молекулы воды представляют собой электрические диполи или, образно говоря, как бы стержни, имеющие явно выраженные положительный и отрицательный концы. Молекула поваренной соли также не совсем симметрична. С одной ее «стороны» слегка преобладает положительный заряд, с другой — отрицательный.

Что случается, когда в воду попадает молекула поваренной соли? Ее окружают молекулы воды. Своими положительными концами они притягиваются к отрицательной стороне молекулы поваренной соли, а отрицательными концами — к положительной стороне. Возникает резко несимметричное электромагнитное поле. Молекула поваренной соли разрывается на два иона, и они,

в свою очередь, тут же оказываются окруженными молекулами воды. Подобное разделение молекул вещества на ионы и называют диссоциацией.

Самой большой потенциальной энергией обладает электрон, не связанный ни с какими атомами. Такую энергию электрона обычно принимают за нуль отсчета. В атоме, находясь в электромагнитном поле ядра и других электронов, каждый электрон обладает меньшей (отрицательной) потенциальной энергией. Представьте себе такую картину. Электрон с нулевой потенциальной энергией попадает в поле положительно заряженного ядра — допустим, речь идет об атоме водорода. Электрон притягивается и движется в сторону ядра, пока не занимает положенное ему в атоме место. Но когда электрон двигается под действием силы, совершается работа. Потенциальная энергия электрона в атоме численно равна нулю (энергия свободного электрона) минус количество работы, совершенной на его пути к атому.

В молекуле потенциальная энергия электрона еще меньше — вычитается доля работы, совершенной при образовании молекулы. В нашем случае энергия иона Cl^- в растворе оказывается меньше его энергии в кристалле. Из первоначального запаса вычитается также и доля работы, совершенной при разрывании молекулы.

Скажем короче. Когда ион Cl^- или любой другой отрицательный ион в растворе оказывается окруженным молекулами воды, образуется электромагнитное поле, энергия которого минимальна. Один из фундаментальных законов природы гласит: всякая физическая система стремится принять такое состояние, в котором ее собственная энергия минимальна. Почему поваренная соль растворяется в воде? Потому что в растворе достигается меньшая, чем в кристалле, энергия.

Природа ленива — вот и ключ к разгадке тайны лягушачьей лапки. Ее заставлял дергаться электрический ток, воздействовавший на нервные окончания. Ток возник на границе между металлом и электролитом, в роли которого выступали жидкости, наполняющие клетки тканей лягушачьей лапки.

На границе

Вы уже знаете, что происходит на границе двух металлов. А что случится, если опустить, например, цинковую пластинку в раствор щелочи KOH ? Металл

цинк — это кристаллическое твердое тело, где имеются валентные электроны и атомные остатки (ионы) Zn^{++} , несущие положительный электрический заряд, равный по абсолютной величине удвоенному элементарному заряду.

Обсуждая свойства кристаллов, мы в основном интересовались поведением электронов. Многие из сказанного относительно электронов справедливо и для ионов. Как и электроны, ионы взаимодействуют с общим электромагнитным полем. В этом поле ион обладает определенной потенциальной энергией, численно равной (со знаком минус) той работе, которую надо затратить, чтобы извлечь ион из кристалла. Средняя величина потенциальной энергии всех ионов Zn^{++} представляет собой одну из составляющих электрохимического потенциала цинка.

При погружении цинковой пластинки в раствор молекулы KOH в основном уже продиссоциировали на ионы K^{+} и OH^{-} . Отдельные ионы Zn^{++} могут переходить в раствор и образовывать соединение ZnO по схеме $Zn^{++} + 2OH^{-} \rightarrow ZnO + H_2O$. Окись цинка ZnO в растворе также частично диссоциирует. Каждый акт перехода одного иона Zn^{++} из металла в раствор — событие случайное. Вполне возможны и противоположные события, когда ионы Zn^{++} переходят из раствора в металл. Однако средняя энергия ионов Zn^{++} в растворе меньше, чем средняя энергия тех же ионов в цинковой пластинке. Поэтому в раствор переходит больше ионов, чем из раствора.

Покидая цинковую пластинку, каждый ион Zn^{++} оставляет там двойной элементарный отрицательный заряд или два электрона, заряды которых не скомпенсированы положительными зарядами. Пластика постепенно заряжается отрицательно, а жидкость вблизи цинковой пластинки — положительно. Между пластинкой и раствором устанавливается разность электрических потенциалов. Когда же наступает равновесие? Когда разность электрических потенциалов (гальвани-потенциалов) становится равной исходной разности средних энергий ионов Zn^{++} в металле и растворе. Электрическое поле препятствует дальнейшим переходам ионов Zn^{++} из металла в раствор. Среднее число таких переходов в единицу времени равно среднему числу переходов из раствора в металл за то же время. Чтобы учесть факт образо-

вания электрического поля, схему реакции записывают так: $Zn^{++} + 2OH^- \rightarrow ZnO + H_2O + 2e$. Слагаемое $2e$ — это два электрона, оставшиеся в цинковой пластинке после того, как из нее ушел ион Zn^{++} .

Пока все происходит, как и в случае контакта двух металлов. Казалось бы, единственное отличие состоит в том, что металлы обмениваются электронами, а на границе металла и раствора происходит обмен ионами, поскольку в растворе свободных электронов нет.

В кольцо

Чтобы образовать замкнутую электрическую цепь, в сосуд со щелочью опустите не одну, а две цинковые пластинки. Для разнообразия соедините их медной проволокой. Ваша замкнутая электрическая цепь содержит четыре контакта между разнородными проводниками. В каждом контакте возникает контактная разность потенциалов (гальвани-потенциал), но подсчет суммы гальвани-потенциалов снова дает нуль. Ничего нового, непонятно, зачем было начинать все сначала?

Однако (в который раз!) не будем спешить. Повторим тот же опыт, но вместо второй цинковой возьмем пластинку из платины. Что происходит на границе раствора и цинковой пластинки, вы уже знаете. А что происходит на границе раствора и платиновой пластинки? Платина — металл благородный и своих ионов не отдает. Но соединенная с цинковой пластинкой, пластинка из платины приобретает избыточный отрицательный электрический заряд. Молекулы воды частично диссоциируют, образуя ионы H^+ и OH^- . Электроны в платиновой пластинке получают возможность переходить в раствор и соединяться с ионами H^+ , образуя атомы водорода. Реакция идет по схеме $H_2O + e \rightarrow H + OH^-$.

Если между платиновой пластинкой и раствором существует контактная разность потенциалов, она обязательно отличается от разности потенциалов между цинком и раствором хотя бы потому, что в первом случае происходит обмен электронами, а во втором — ионами. Следовательно, теперь сумма гальвани-потенциалов в замкнутой цепи не равна нулю и в цепи может протекать ток. Так и есть на самом деле, причем в металлических проводниках переносчиками тока являются электроны,

а в растворе — ионы OH^- , которые перемещаются от платиновой пластинки к цинковой.

Как объяснить это явление? Чем отличается контакт двух металлов от контакта металла и раствора? На этот счет имеется несколько версий. Можно сказать, например, что электроны, перешедшие через границу двух металлов, притягиваются к оставшимся «на родине» положительным зарядам, и это не позволяет им отойти далеко от границы раздела. Ионы OH^- , окруженные молекулами воды, слабо взаимодействуют друг с другом. Они свободно перемещаются (диффундируют) во все стороны, но те из них, что случайно оказываются возле цинковой пластинки, вступают в реакцию окисления цинка и выбывают из игры. Предлагая такое объяснение, говорят, что наличие тока в цепи объясняется наличием в растворе (электролите) переносчиков заряда — ионов.

Согласно второй версии основными виновниками считаются атомы водорода. В реакции $\text{Zn}^{++} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{ZnO} + \text{H}_2\text{O} + 2e$ каждая молекула OH^- разделяется на ионы O^- и H^+ . Ион O^- вступает в реакцию с ионами Zn^{++} , образуя молекулу ZnO . Ион H^+ в составе молекулы воды путешествует к платиновой пластинке, т. е. служит переносчиком положительного заряда, и участвует там в реакции $\text{H}_2\text{O} + e^- \rightarrow \text{H} + \text{OH}^-$. Такое «водородное» объяснение имеет свои преимущества.

И все же более соответствует природе вещей, хотя и менее наглядно, следующее объяснение. В реакции, проходящей на границе цинк — металл, образуется новое вещество — окись цинка. Цинк окисляется или попросту спорает. Поскольку средняя потенциальная энергия ионов Zn^{++} в металле больше, чем в окиси, в ходе реакции выделяется энергия. Эта избыточная энергия позволяет совершить работу, связанную с прохождением тока в замкнутой цепи. Система, состоящая из банки со щелочью, цинковой и платиновой пластинок, представляет собой маленькую тепловую электростанцию.

Да, да, тепловую — мы не оговорились. В этой системе, называемой, к слову сказать, гальваническим элементом, происходит процесс сжигания цинка. В результате выделяется тепловая энергия (тепло — это движение частиц). Только в нашем случае эта энергия проявляется не в форме беспорядочного движения молекул, а в форме упорядоченного движения электронов в металле

и переносчиков в растворе. Благодаря упорядоченности качество энергии оказывается выше.

Гальванический элемент обладает многими существенными достоинствами. Поскольку химическая энергия топлива (цинка) превращается в нем непосредственно в энергию электрическую, минуя промежуточные стадии, кпд таких элементов равняется 60%, а у лучших образцов доходит до 80%, в то время как у настоящих тепловых электростанций кпд не бывает выше 30%. Но вот беда! Если вместо медного проводника включить, скажем, электрическую лампочку, она загорится, но — увы! — перестанет гореть через несколько минут. Виноват во всем водород. Пузырьки водорода покрывают платиновую пластинку сплошным слоем и изолируют ее от раствора. Такое явление называется поляризацией. Наша конструкция гальванического элемента требует усовершенствования.

Электроды

Реакцию, которая происходит между цинковой пластинкой и раствором, называют электродной. Кроме обычных для химических реакций исходных веществ, в процессе электродных реакций выделяются (или поглощаются) еще и электроны. Процесс, в результате которого у атомов вещества (в нашем случае цинка) отнимаются электроны, называют окислением. Электрод, на котором протекает окислительный процесс, т.е. тот электрод, в который уходят электроны, называется анодом. Соответственно второй электрод, из которого электроны поступают, называется катодом. Электродную реакцию окисления называют анодной реакцией. Совсем не обязательно электроды должны быть металлическими или даже твердыми. Часто используют, например, газообразные электроды. Переносчик ионов (электролит) тоже совсем не обязательно должен представлять собой раствор. Электролиты бывают разные, в том числе и твердые.

Попытаемся усовершенствовать гальванический элемент. В уже знакомую вам банку со щелочью КОН поместим цинковую пластинку и электрод, представляющий собой решетку из окиси серебра Ag_2O . Окись серебра взаимодействует с раствором, происходит реакция $\text{Ag}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2e \rightarrow 2\text{Ag} + 2\text{OH}^-$.

В процессе окисления окисляемое вещество отдает

свои электроны. В молекуле окиси серебра валентные электроны атомов серебра отданы «на общие нужды», они участвуют в формировании структуры молекулы. Получая от электрода два дополнительных электрона, молекула окиси серебра распадается на два нейтральных атома серебра и ион кислорода O^{2-} с двумя лишними электронами. Всякая реакция, в ходе которой атомы вещества получают электроны, называется реакцией восстановления. В нашем случае чистое серебро восстанавливается из окиси и выделяется на электроде, который мы условились называть катодом. Поскольку в ходе реакции участвуют электроны, ее также называют электродной, в отличие от реакции с цинком это не анодная, а катодная электродная реакция.

Освободившиеся в результате катодной реакции ионы кислорода реагируют с водой, образуя два иона OH^- . Эта реакция, по сути дела, не является электродной, однако в ее ходе в электролит переходят отрицательно заряженные ионы. Электролит постепенно приобретает отрицательный заряд. Если электроды не соединены, между электродом и раствором устанавливается равновесная разность электрических потенциалов, опять-таки равная исходной разности электрохимических потенциалов, — все точно так же, как в реакции с цинком.

Если соединить электроды проводником, образуется замкнутая электрическая цепь, и по ней потечет ток. При этом поддерживается равенство: на каждый окислившийся (сгоревший) атом цинка приходится два атома восстановившегося серебра. Равенство это поддерживается потому, что в катодной реакции участвуют только электроны, пришедшие с анода.

Ну а в электролите? Здесь снова предлагаются два описания. Согласно первому образовавшиеся в результате катодной реакции ионы OH^- перемещаются к аноду и там участвуют в анодной реакции. Согласно второму объяснению полученные в результате анодной реакции атомы водорода в составе молекул воды путешествуют к катоду. Но теперь они не выделяются на катоде (поляризация), а соединяются с освободившимися в результате катодной реакции атомами кислорода, давая все тот же ион OH^- .

Еще одна подробность, на которую стоит обратить внимание. Ионы OH^- , согласно одному из описаний, путешествуют от катода к аноду. Но на самом деле это не

обязательно. Конечно, ничто не препятствует какому-нибудь конкретному, рожденному у катода иону OH^- совершить путешествие через всю банку к аноду. В отличие от электронов ионы достаточно четко локализованы в пространстве, и в принципе такое путешествие можно было бы даже проследить. Но необходимости в таком путешествии нет. Все что нужно — это чтобы общая концентрация ионов OH^- в электролите поддерживалась постоянной. Ведь фактически расходуются только цинк, необратимо переходящий в окись цинка, и окись серебра, из которой выделяются атомы серебра. Для протекания тока не нужно, чтобы молекулы окиси цинка переходили к катоду или атомы серебра к аноду.

Что же касается ионов OH^- , то вполне допустимо и такое описание. Вблизи катода ионы OH^- присоединяют к себе ионы водорода и образуют воду, а вблизи анода вода диссоциирует и образует ионы OH^- . Общий баланс вещества при этом не меняется. Это особенно справедливо для электронов. Совершенно не обязательно, чтобы длиннейшее путешествие от анода к катоду совершал какой-либо конкретный электрон. Физикой установлено, что электроны не имеют индивидуальности. Электрон, как уже говорилось, вполне может «исчезнуть» (например, «провалиться» на один из низких уровней) у анода и в тот же миг «родиться» (выскочить на уровень свободной зоны) у катода. Важно, чтобы общее количество электронов, выделившихся у анода, было равно общему количеству электронов, потребленных у катода.

Аккумуляторы

Серебряно-цинковый гальванический элемент обладает еще одним замечательным свойством. Нормально при протекании тока расходуются цинк и окись серебра. Теоретически ток протекает до тех пор, пока не израсходуется весь цинк или вся окись серебра, или то и другое вместе. На самом деле ток перестает протекать (мы говорим, батарейка сгорела) гораздо раньше.

Что произойдет, если серебряно-цинковый элемент подсоединить к внешнему источнику электрической энергии анодом к отрицательному полюсу, а катодом — к положительному? На аноде образуется избыток электронов. Обладая относительно высокой средней энергией, они поступят в раствор и послужат причиной реакции

восстановления: $\text{ZnO} + \text{H}_2\text{O} + 2e \rightarrow \text{Zn} + 2\text{OH}^-$. Наоборот, атомы серебра на катоде, отдавая свои электроны внешнему источнику электрической энергии, окисляются: $2\text{Ag} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Ag}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2e$. Через некоторое время элемент приходит в такое состояние, как будто в нем не расходовались цинк и окись серебра.

Электродные реакции, легко протекающие как в одну, так и в другую сторону, называют обратимыми. Элементы с обратимыми электродными реакциями называют аккумуляторами. Аккумулятор можно заряжать от внешнего источника электрической энергии и разряжать, подсоединяя к его электродам какой-нибудь потребитель, например электрическую лампочку. Теоретически количество циклов заряда-разряда может быть сколь угодно большим, на самом деле оно, конечно, ограничено. Свойством обратимости электродных реакций и, следовательно, способностью работать как аккумуляторы обладают далеко не все гальванические элементы.

Элемент Лекланше

Вы купили в магазине батарейку для карманного фонарика или транзисторного радиоприемника. Знаете ли вы, что она представляет собой? Марганцево-цинковый элемент или батарею, состоящую из нескольких таких элементов. Первый марганцево-цинковый элемент в 1865 году создал французский инженер Ж.-Л. Лекланше. Элемент состоял из стеклянной банки с раствором хлорида аммония (нашатыря) NH_4Cl , в который были погружены цинковый стержень (отрицательный электрод) и керамический пористый сосуд, наполненный смесью двуокиси марганца MnO_2 и порошка кокса, с угольным стержнем — токоотводом (положительный электрод). В 1868 году было изготовлено более 20 000 таких элементов.

Со временем цинковый стержень заменили цинковым стаканом, который одновременно служил и анодом, и корпусом элемента. С смесь марганца и порошка кокса вместо керамического сосуда стали помещать в тканевый мешочек или бумажный патрон. В 1880-х годах начали использовать так называемый загущенный электролит, и элементы Лекланше превратились в сухие элементы. В таком виде практически почти без изменений они до-

жили до наших дней. Сейчас во всем мире ежегодно производится 7—9 млрд. элементов.

Так же, как и в серебряно-цинковом элементе, в элементе Лекланше топливом служит цинк.

Оказалось, однако, что элементы Лекланше не удовлетворяют всем требованиям. На смену им приходят щелочные марганцево-цинковые элементы. Первый такой элемент был предложен в 1912 году, но только в 60-х годах в результате интенсивных работ, начатых в СССР и впоследствии проводимых в разных странах, были созданы улучшенные варианты щелочных марганцево-цинковых элементов, которые и получили сегодня широкое распространение.

Для питания наручных электронных часов и карманных калькуляторов чаще всего используются ртутно-цинковые элементы. По сравнению с любыми другими химическими источниками тока у ртутно-цинковых элементов удастся снять самое большое количество энергии с единицы объема. Маленькие батарейки в ручных электронных часах работают без смены целый год, а то и больше. Ртутно-цинковые элементы в принципе можно подзаряжать, но заряжаются они плохо. Поэтому в тех случаях когда расход энергии относительно велик, например в слуховых аппаратах и карманных фонариках, лучше пользоваться аккумуляторами.

Топливные элементы

Все знают, как незаменим бывает электрический фонарик темной ночью в лесу. Приятно взять с собой на загородную прогулку транзисторный приемник или магнитофон, если, конечно, не включать их на полную мощность, отравляя тем самым существование окружающим. Не менее хорошо мы знаем и то, как быстро садятся батарейки, особенно в карманных фонариках. И никому не приходит в голову построить, скажем, автомобиль, приводимый в движение от гальванических элементов.

Кпд гальванических элементов очень высок. Топливо в них используется эффективнее, чем у тепловых электростанций, однако в качестве топлива применяют остродефицитные и дорогие металлы, такие, как цинк, кадмий, ртуть. Кроме того, существующие конструкции гальванических элементов не позволяют добавлять топливо

по мере его расходования. Да в этом и нет необходимости, вряд ли кто-нибудь станет серьезно говорить об автомобиле или тепловозе, у которых в качестве горючего предлагалось бы использовать цинк или кадмий. Уделом гальванических элементов, по всей вероятности, так и останется питание радиоприемников, магнитофонов, электронных часов, карманных фонариков и калькуляторов.

А как обстоит дело с аккумуляторами? Тяговые аккумуляторы широко выпускаются промышленностью. И в нашей стране, и за рубежом давно уже созданы и опробованы образцы легковых и грузовых автомобилей, электрокаров и т. п. с питанием от аккумуляторов. Проблема создания электромобилей стала сейчас особенно насущной в связи с необходимостью всеми силами бороться за чистоту окружающей среды.

Тяговые аккумуляторы дают возможность автомобилю проехать без подзаряда 100—130 км. Однако и тут есть свои неприятности. Их много, а главная состоит в том, что заряд аккумулятора — процесс длительный. Для полного заряда свинцового аккумулятора требуется 16—20 ч. Это время можно существенно уменьшить, и все же мы не согласимся проводить на заправочной станции по 2—3 ч после каждых 100 км пробега. В чем здесь причина? В аккумулятор не добавляется топливо. Оно лишь восстанавливается при протекании электрического тока. Как было бы заманчиво создать гальванический элемент, в который добавляют топливо по мере его расходования и в качестве топлива используют легкодоступные и дешевые вещества.

В 1839 году английский исследователь У. Гров пропускал электрический ток через два платиновых электрода, опущенных в раствор серной кислоты. В результате на одном из электродов выделялся водород, а на втором — кислород. Гров заметил, что после отключения источника тока между электродами сохраняется небольшое напряжение, и если замкнуть их проволочкой, то по ней течет электрический ток. Того же эффекта можно добиться, если получать кислород и водород не в результате разложения электролита (электролиз), а подводить эти газы к электродам по трубкам.

Происходящие здесь реакции не составляют для нас ничего нового. Если опустить два электрода в раствор щелочи и обдувать их: один — водородом, а другой ки-

слородом, то на водородном (отрицательном) электроде будет происходить реакция $\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + 2e$. Два электрона освобождаются в результате реакции и переходят в раствор. Мы теперь знаем, почему. Потому что энергия электрона в атоме водорода выше, чем энергия электрона в кристаллической решетке металла. Водород теряет электроны, т. е. окисляется, сгорает. На кислородном электроде происходит реакция $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2e \longrightarrow 2\text{OH}^-$. Реакция идет с присоединением двух электронов, т. е. электрод заряжается положительно. Все остальные детали мы уже обсуждали.

После опытов Грова стало ясно, что кислород можно добывать из обычного воздуха, а водород — из различных природных видов топлива, например природного газа. Отсюда в 1889 году возникло название «топливный элемент».

В 1894 году известный немецкий физикохимик В. Оствальд впервые высказал идею о том, что использовать топливо в топливных элементах намного выгоднее, чем в тепловых электростанциях, поскольку КПД топливных элементов значительно больше (до 80%).

В 1947 году советский исследователь О. К. Давтян опубликовал первую монографию по топливным элементам. В 1958 году Ф. Бэкон в Англии создал установку мощностью 5 кВт на основе кислородно-водородных элементов. Кислородно-водородные установки с топливными элементами (электрохимические генераторы) использовались на борту американских космических кораблей «Джемини» и «Аполлон». Они снабжали космонавтов не только электроэнергией, но и водой.

В конце 60-х годов американская фирма «Юнион карбайд» продемонстрировала четырехместный легковой электромобиль, оборудованный водородно-воздушным электрохимическим генератором мощностью 6 кВт. Запас водорода в баллонах обеспечивал пробег до 320 км при скорости около 60 км/ч. В 1973 году в нашей стране был создан электрокар с электрохимическим генератором, работающим на водороде и воздухе.

Хотя до сих пор промышленностью еще не выпускаются электрохимические генераторы, есть все основания полагать, что выпуск их и широкое использование в самых различных областях начнутся в обозримом будущем. Какие трудности стоят на этом пути? Их несколько, и среди них выделяются две главные. Первая состоит

в том, что водород как топливо хотя и не дефицитен — его можно получать, например, из воды, но достаточно дорог. Можно добывать водород из обычного топлива, если измельченный уголь обрабатывать водяным паром. Происходит реакция $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$. Полученную смесь CO и H_2 еще раз обрабатывают водяным паром, после чего образуется двуокись углерода CO_2 и дополнительный водород. Но подобная добыча водорода сопряжена с затратами энергии, поэтому кпд электрохимических генераторов, работающих с такими видами топлива, как уголь и природный газ, оказывается не более 40%.

Но это еще полбеды. Хуже обстоит дело со второй трудностью. О ней мы должны были бы сказать в самом начале обсуждения принципа действия гальванических элементов. Не случилось этого потому, что, поскольку речь шла о батарейках для карманных фонариков и магнитофонов, нас мало интересовал, скажем, максимальный ток, который создает элемент, или все тот же кпд.

На что же следовало обратить внимание? Электродные реакции проходят с определенной скоростью. Например, количество ионов цинка, переходящих в раствор в единицу времени из металла в электролит, определяется химической активностью выбранной пары цинк—электролит. Повысить это количество можно одним-единственным способом, увеличив поверхность соприкосновения цинка с электролитом. В частности, для этого использовались порошковые цинковые электроды. В случае топливных элементов все обстоит сложнее. Здесь в одном месте должны встретиться не две, а три фазы: твердый электрод, жидкий электролит и газ (водород или кислород). Скорость реакции существенным образом зависит от того, сколько газа растворено в электролите, а водород и кислород растворяются очень плохо.

Одно из решений этой проблемы состоит в том, чтобы использовать пористые электроды — у них большая поверхность. Электрод изготавливается из смеси двух веществ, одно из которых хорошо смачивается водой, — такие вещества называют гидрофильными. Поры в гидрофильном веществе заполняются электролитом. Другое вещество, наоборот, отталкивает воду — такие вещества называют гидрофобными. Поры в нем заполняются газом. Все это хорошо на бумаге, а в жизни встречаются

все новые и новые трудности, из-за которых мы до сих пор не имеем дешевых и эффективных электрохимических генераторов, хотя, казалось бы, есть все основания для оптимизма.

Животное электричество

Заканчивая эту главу, мы познакомимся еще с одной идеей. Как и в топливном элементе, в живой клетке реакции, сопровождающиеся выделением энергии, происходят либо в жидкой фазе, либо на границе жидкой и твердой фаз. Поэтому участвовать в реакциях могут только газы, растворенные в жидкости. Кислород и водород растворяются плохо — это одна из важных трудностей при изготовлении топливных элементов. Эта проблема решается путем использования пористых электродов из гидрофильных и гидрофобных веществ.

Природа решила эту проблему иначе. В живой клетке кислород и водород присутствуют не в чистом виде. Молекулы кислорода и водорода присоединяются к молекулам специальных веществ-переносчиков. Переносчиком кислорода служит гемоглобин и сходные с ним вещества. Одна молекула гемоглобина может перенести до четырех молекул кислорода.

Переносчиками водорода служит целая группа химических соединений, среди которых наибольшее значение имеет никотинамидаденинуклеотид (НАД). НАД не только переносит водород, но и «выдирает» атомы водорода из окисляемых молекул пищи. За каждый заход молекула НАД забирает по два атома водорода, одновременно способствуя тому, чтобы один из них распался на две заряженные частицы: протон и электрон. При этом отрицательный электрон остается присоединенным к молекуле переносчика, а положительный протон (ион водорода) переходит в раствор.

В топливных элементах «выдирание» атомов водорода из молекул топлива осуществляется, например, при обработке угля водяным паром. Но для этого нужны высокие температуры. В клетках та же задача решается с помощью специальных химических веществ — ферментов.

Известно, что отдельные ферменты можно извлекать из клеток и использовать в технологических процессах. Это давно применяется в виноделии, хлебопечении, сыроварении. Но извлечь комплексно несколько десятков

ферментов, чтобы перерабатывать, скажем, глюкозу в водород, связанный с переносчиком, пока еще практически невозможно.

А если поступать иначе? Если использовать живые клетки? Интересную идею конструкции электрохимического генератора предложил доктор медицинских наук И. С. Балаховский. Взвесь одноклеточных организмов, например дрожжей, в жидкости, содержащей питательные вещества, заключают в герметичный сосуд. Клетки активно поглощают питательные вещества и превращают их в угольную кислоту и водород, присоединенный к переносчику. Водород не окисляется, поскольку кислорода в сосуде нет. Вместо этого в сосуд подается пировиноградная кислота, которая легко проникает сквозь оболочки клеток и, присоединяя к себе два атома водорода, превращается в молочную кислоту. Молочная кислота также легко проникает сквозь оболочки клеток и может быть выведена из сосуда и подведена к водородному электроду топливного элемента. Здесь она окисляется, превращаясь в пировиноградную кислоту, цикл повторяется.

Кпд такой системы невысок, и сама идея требует экспериментальной проверки. Но познакомившись с ней, мы вправе спросить: можно ли называть электричество, вырабатываемое при посредстве живых клеток, животным электричеством? Кто же все-таки оказался прав — Гальвани или Вольта?

Конечно, никакого животного электричества нет. Электричество, т. е. электрические заряды и электромагнитные поля, едино по своей природе и лежит в основе всей окружающей нас материи. Как это часто бывает в науке, правыми оказались оба, и Гальвани, и Вольта, хотя они высказывали на первый взгляд противоположные мнения.

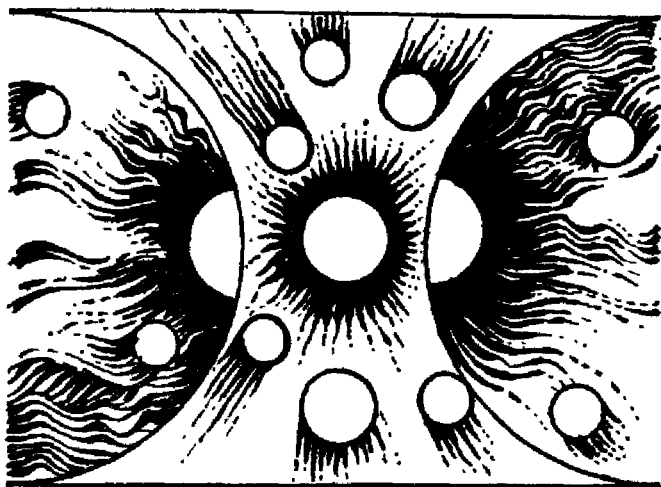
В любой батарее или, выражаясь более научно, в любом химическом источнике тока окисляется, т. е. сгорает, топливо, как в топке парового котла. Однако в топке котла молекулы топлива и кислорода сталкиваются случайным образом. Выделяющаяся при этом энергия расходуется на увеличение скорости движения молекул, причем это движение происходит хаотически. Иначе говоря, энергия, выделяющаяся при химической реакции окисления, расходуется на повышение температуры.

В химическом источнике тока энергия, выделяющаяся

в результате химической реакции окисления, также затрачивается на организацию движения ионов в электролите и электронов в проводнике. Но это движение упорядоченное. Оно совершается преимущественно в одном направлении. Чтобы заставить частицы материи двигаться упорядоченно, создают специальную систему из электродов и электролита. Благодаря различию электрохимических потенциалов на границах между веществами возникают как бы потенциальные горки (говорят, потенциальный рельеф). Электроны и ионы скатываются по этим горкам в заданном направлении. Любой химический источник тока объединяет в себе два различных процесса: освобождение химической энергии и упорядочение возникающего при этом движения. Благодаря наличию второго процесса получается энергия более высокого качества, чем тепловая.

ГЛАВА 5

Атомы и атомная энергия



Секреты

В августе 1945 года мир узнал о варварских атомных бомбардировках японских городов Хиросимы и Нагасаки. Все простые люди земного шара были возмущены этой совершенно ненужной в военном отношении акцией США. Вот при таких трагических обстоятельствах стало известно, что ученым удалось овладеть одним из самых сокровенных, по тогдашним представлениям, секретов природы — секретом атомной энергии.

Каково было настроение умов предвоенного времени? Подавляющее большинство научно-фантастических романов посвящалось либо космическим полетам, либо атомной энергии. Достижения науки эпохи бури и натиска подготовили общественное мнение к возможности революционных преобразований в науке и технике. Рассматривались многочисленные проекты космических кораблей и атомных электростанций. Тем не менее и к космическим полетам, и к атомным энергетическим установкам относились как к весьма заманчивой, но очень далекой, почти несбыточной мечте. Пожалуй, никто из людей 30-х годов (за исключением, конечно, специалистов) серьезно не рассчитывал стать свидетелем атомного

взрыва или пуска атомной электростанции. Отсюда, наверное, и та настойчивость, с которой атомная тема повторялась в научной фантастике.

Первое искусственное расщепление ядер произвел Резерфорд, в 1919 году он бомбардировал альфа-частицами азот. В результате такой бомбардировки образовались отдельные протоны и неустойчивый изотоп фтора, который быстро превращался в изотоп кислорода-17. В 1930 году при бомбардировке альфа-частицами бериллия получили излучение с весьма большой проникающей способностью. Д. Чедвик сразу предположил, что это поток ранее неизвестных частиц — нейтронов, во всем, за исключением заряда, подобных протону. Тем же Чедвиком нейтрон был вскоре обнаружен экспериментально. Произошло это в 1932 году. Наконец, в 1936—1937 годах немецкие ученые О. Ган, Лиза Мейтнер и Ф. Штрассман проводили опыты с целью получить трансурановые элементы, т. е. элементы с атомным номером более 92. В результате оказалось, что ядро изотопа уран-235 захватывает нейтрон, а после этого делится на два осколка со средними атомными весами и испускает несколько нейтронов.

За неполные 40 лет физика прошла путь, начиная от обнаружения естественной радиоактивности и кончая во всяком случае теоретическим предсказанием возможности осуществления цепной реакции по превращению тяжелого элемента уран-235 в два других элемента, расположенных в средней части таблицы Менделеева. Тогда же выяснилось, что при распаде ядер урана выделяется очень большое количество энергии.

Результаты перечисленных работ, не исключая опытов Гана, Мейтнер и Штрассмана, широко публиковались. Поэтому после 1937 года каждый старшеклассник мог представить себе четко реакцию ядерного распада. Бомбардируем уран-235 нейтронами. Нейтрон попадает в ядро, разбивает его на два осколка, при этом образуются, скажем, два новых нейтрона. Если хотя бы один из двух нейтронов вызывает деление соседнего ядра, то дальше процесс развивается самопроизвольно: второе расколотое ядро снова порождает два нейтрона, хотя бы один из них разбивает третье ядро и т. д.

При распаде каждого из ядер выделяется около 150 млн. эВ энергии. Вы представляете себе, что это такое? 1 эВ эквивалентен $1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг. Энергией 1 эрг

обладает шарик массой 1 г, движущийся со скоростью примерно 1,5 см/с. Энергия 150 млн. эВ соответствует $2,4 \cdot 10^{-4}$ эрг. Такой энергией обладает тело массой 1 мг, движущееся со скоростью 0,7 см/с. И то и другое — величины, вполне доступные нашим органам чувств. Энергии, которая выделяется при распаде одного-единственного ядра атома урана, достаточно, чтобы подбросить небольшую песчинку. Наш пример еще раз подтверждает мысль, которую мы последовательно проводим в этой книге: не существует какого-то микромира и какой-то особой физики, справедливой лишь в микромире.

Мышеловки

Итак, после 1937 года каждому старшекласснику могло быть ясно, как высвободить излишки энергии, хранящиеся в атомах урана, т. е. вызвать цепную реакцию. Но в проводимых тогда опытах почему-то ничего подобного не получалось. Более того, сам Резерфорд категорически не верил в реализуемость атомных взрывов и атомных энергетических установок. Свое неверие он сохранил до самой смерти. Не очень верил в атомную бомбу и Альберт Эйнштейн. Правда, он подписал письмо к тогдашнему президенту США Рузвельту, в котором указывал на возможность создания атомного оружия в фашистской Германии. Сделал он это не потому, что верил в такую возможность. Эйнштейн считал, что в столь серьезном деле никакая предосторожность не окажется лишней. Не верил в реализуемость атомных взрывов и Нильс Бор. Не верил до тех пор, пока такая возможность не стала очевидной.

В чем же дело? Значит, все-таки был секрет, которого не знал Резерфорд и до последнего момента не знали Эйнштейн и Бор? В первых общедоступных публикациях об атомной бомбе все объяснялось именно так, как мы описали. Один нейтрон (он может залететь, например, вместе с космическими лучами) расщепляет одно атомное ядро урана. В результате расщепления выделяются энергия и несколько нейтронов, способных расщепить соседние атомные ядра.

Представляете себе, что будет, если выстрелить по кирпичу? Кирпич развалится на части, если, конечно, пуля в него попадет. При этом не выделится никакой энергии — энергия пули целиком уйдет на разрушение

кирпича. В середине 50-х годов на лекциях по физике в Московском энергетическом институте демонстрировалась модель атомной бомбы, сделанная из... мышеловок. На лабораторный стол устанавливалось штук тридцать мышеловок, обычных, с дужками. Все мышеловки взводили и на каждую дужку клали по два грузика. На одну из дужек укладывали один грузик, а второй бросали на нее. Мышеловка срабатывала. Грузик, положенный на дужку, взлетал вверх. Дальше все зависело от того, насколько плотно располагались мышеловки. Если они стояли далеко друг от друга, то взлетевший грузик падал, как правило, на стол и ничего не происходило. Если же мышеловки располагались вплотную друг к другу, упавший грузик заставлял подскакивать два. Те падали на две мышеловки. Они, в свою очередь, подбрасывали четыре грузика — срабатывали четыре мышеловки и т. д. Зрелище получалось весьма впечатляющее.

Вот теперь намечалось нечто подобное секрету. Чтобы модель работала, необходимо заранее ввести в нее запас энергии, сжимая пружину мышеловки. Грузик (нейтрон) лишь высвобождает этот запас. Модель иллюстрировала понятие критической массы.

Мы не раз говорили, что атомные ядра — это очень маленькие объекты. Маленькие по сравнению с расстояниями между ними. Попасть в такой объект не так-то просто, особенно нейтрону, испущенному в произвольном направлении. Помните опыты Резерфорда с бомбардировкой металлических листиков альфа-частицами? Из 100 тыс. альфа-частиц примерно одна взаимодействовала с ядром и возвращалась назад. Для того чтобы каждый из испущенных ядром нейтронов вызвал расщепление очередного ядра, нужно, чтобы ядра располагались близко друг к другу, что невозможно, или чтобы этих ядер было достаточно много. Ученым удалось подсчитать, что цепная реакция в уране-235 возможна, если сосредоточить примерно 20 кг урана. Двадцать килограммов — это и есть критическая масса. Меньше 20 кг урана не взрывается, а больше 20 кг взрывается самопроизвольно, потому что один нейтрон всегда найдется.

Ядра и радиоприемники

Значит, секрет атомной бомбы заключается в критической массе? Критическую массу, конечно, надо знать,

но главное состояло не в этом. Нет, не было никакого секрета. Нужно было понять, как именно выглядит атомное ядро, а для этого полностью, именно полностью, а не частично, отказаться от привычных представлений. Замечательнее всего, что и Резерфорд, и Эйнштейн, и многие другие ученые рангом пониже, будучи сами творцами современной физики, не могли до конца поверить в собственные идеи.

Эйнштейн так и не поверил, что, по его собственному выражению, бог бросает кости перед тем, как вызвать к жизни то или иное явление. Иначе говоря, Эйнштейн не верил, что мир можно описывать в терминах теории вероятностей. Эрвин Шредингер — творец волновой механики — потратил много сил на то, чтобы примирить свою механику с классической. Пожалуй, самым последовательным из создателей новой физики был Нильс Бор, но и у него, как мы видели, оставались сомнения. В необходимости отрешиться от представлений классической физики и содержался великий драматизм эпохи бури и натиска.

Зачем нужно было отказываться от привычных представлений, чтобы понять механизм расщепления ядер урана? А вот зачем. Продолжим опыт с кирпичом. Вы стреляете из винтовки в кирпич, желая расколоть его на части. Что надо для того, чтобы кирпич раскололся? Во-первых, в него попасть, причем по возможности в середину. Если пуля лишь чиркнет по поверхности, кирпич либо вообще не расколется, либо от него отвалится небольшой кусок. Во-вторых, чтобы пуля обладала необходимой энергией. Пуля на излете кирпича не расколется.

В случае с атомами урана-235 все обстоит наоборот. Нейтрону попадать в само ядро не обязательно — достаточно оказаться на определенном расстоянии. В атомной физике существует понятие эффективного сечения — площадки, в пределах которой должен оказаться нейтрон или другая бомбардирующая частица, для того чтобы произошла реакция деления. Эффективное сечение гораздо больше размеров самого ядра. Но далеко не всякий нейтрон вызывает реакцию деления. Если энергия нейтрона меньше, чем надо, реакции не произойдет. Это понятно — все так же, как с кирпичом.

Но реакция деления не произойдет и в том случае, если энергия нейтрона слишком велика! Не произойдет,

даже если нейтрон пролетит через самый центр ядра. Подобная ситуация представляется совершенно парадоксальной: слабый медленный нейтрон раскалывает ядро, а быстрый и энергичный — нет. Но все именно так, а не иначе. Почему? Потому что и нейтрон, и атомное ядро — это все что угодно, только не твердый шарик.

Кстати, мы сказали «нейтрон пролетит через самый центр ядра» исключительно для красного словца. Нейтрон не может пролететь через середину ядра по той простой причине, что ни у нейтрона, ни у ядра нет середины. Как у любых объектов реального мира, у них нет точного положения в пространстве. Это следствие уже много раз упоминавшегося соотношения неопределенностей.

Ядро ведет себе вовсе не как кирпич, а, скорее, как радиоприемник. Антенна радиоприемника испытывает воздействие огромного количества радиосигналов. Но слышим мы передачи только той станции, на волну которой настроен приемник. То же самое и с ядром. Оно может подвергаться воздействию огромного количества разных частиц, не обязательно нейтронов, но прореагирует лишь с частицей, обладающей строго определенной энергией. Аналогия с радиоприемником окажется полной, если вспомнить, что, согласно гипотезе де Бройля, гипотезе, которая со временем превратилась в строгую физическую теорию, каждой материальной частице соответствует волна, а длина этой волны обратно пропорциональна энергии частицы. Именно в физическую реальность волн де Бройля ученым труднее всего было поверить. Согласитесь, если окончательно допустить, что, скажем, молоток — на самом деле не молоток, а волна, то вряд ли что-нибудь останется от столь любезной нашему сердцу классической физики.

Неумолимые опыты подтвердили: ядра урана-235 почти не реагируют на нейтроны, образующиеся при расщеплении этих ядер. Не реагируют потому, что энергия нейтронов чересчур велика. Продолжая аналогию с радиоприемником, скажем, что расщепляющиеся ядра излучают на коротких волнах, а сами они настроены на длинные волны — приема не получается. Но если радиостанция расположена очень близко, вы все же услышите ее сигналы даже с помощью ненастроенного приемника. То же самое происходит и с ураном-235. Вероятность взаимодействия ядра с нейтроном очень мала. Но если

ядер много, то одно из них в конце концов прореагирует с нейтроном. Отсюда критическая масса.

Но вот беда — в природном уране изотоп уран-235 содержится в ничтожно малом количестве. В основном природный уран содержит изотоп уран-238, очень неохотно расщепляющийся при взаимодействии с нейтронами. Поскольку уран-238 и уран-235 изотопы, они обладают одинаковыми химическими свойствами. Различить их по химическим свойствам невозможно, единственное отличие — масса ядра. Физики знают хороший способ разделения ядер с различными массами. Образуют струю ионизированных ядер (вещество распыляется) и эту струю пропускают сквозь магнитное поле. В магнитном поле заряженные ядра отклоняются, причем более легкие отклоняются на больший угол, так как у них меньше инерция. Прибор, работающий по этому принципу, называется масс-спектрографом.

Согласитесь, что набирать 20 кг урана-235 по одной молекуле — задача нереальная. Поэтому основную часть усилий, связанных с созданием атомной бомбы, затратили на изыскание способов разделения изотопов урана. Снова секрет без секрета. Итак, что означало раскрыть секрет атомной бомбы? Окончательно поверить в то, что ядро — это не твердый шарик и ведет оно себя не как кирпич, а как радиоприемник. Поверить, а не узнать, потому что теоретикам все это было известно. Затем требовалось найти подходящий материал, что не представляло особого труда, и наконец найти способы разделения изотопов урана. Все это давно позади, а мы с вами постараемся уяснить, откуда берется энергия при расщеплении ядра.

Нуклоны

В квантовой физике действует закон сохранения, с которым мы уже знакомы. Это закон сохранения электрического заряда, который гласит: при процессах (говорят, реакциях) исчезновения и рождения частиц сумма электрических зарядов до реакции должна быть в точности равна сумме электрических зарядов после реакции. Электрический заряд нейтрона — нуль. Сумма плюс единицы (протон) и минус единицы (электрон)

также равна нулю. Закон сохранения заряда удовлетворяется, а значит, ничто не запрещает нейтронам исчезать. а протонам и электронам рождаться. Вот они и исчезают и рождаются. Не забывайте только, что распадаются лишь свободные нейтроны. Нейтроны, входящие в состав ядер, устойчивы.

В каждом атомном ядре имеются и протоны и нейтроны. У легких ядер количество нейтронов в ядре примерно равно количеству протонов, например, знаменитые альфа-частицы (ядра гелия), содержащие два протона и два нейтрона. Количество протонов определяет заряд (зарядовое число), а следовательно, и химические свойства элемента. Заряд ядра соответствует месту данного элемента в периодической таблице Менделеева, и поэтому его называют также атомным номером. Общее количество нуклонов определяет массу ядра (массовое число). Ядро урана, к примеру, содержит 92 протона. Его заряд равен 92, и занимает уран 92-ю клетку в таблице Менделеева. Всего в ядре урана 238 нуклонов (имеется в виду изотоп уран-238). Значит, в ядре урана на 92 протона приходится 146 нейтронов.

Почему протоны ядер, несущие на себе одноименные заряды и, следовательно, отталкивающиеся друг от друга с гигантскими силами, учитывая малость расстояния между ними, не разлетаются в разные стороны? Вопрос этот достаточно помучил физиков в свое время. Он был снят, когда окончательно, в том числе и опытным путем, было доказано, что нуклоны способны взаимодействовать друг с другом на расстоянии с помощью особого поля, в корне отличного от электромагнитного и получившего название поля сильных взаимодействий. Это поле в несколько миллионов раз мощнее электромагнитного. Поэтому применительно к нуклонам в ядре можно забыть об электромагнитном отталкивании и считать, что между ними действуют лишь сильные взаимодействия.

Под влиянием сильных взаимодействий все нуклоны притягиваются друг к другу, причем два нейтрона притягиваются точно так же, как протон с нейтроном или как два протона. Правда, поле сильных взаимодействий проявляется на ничтожно малых расстояниях, порядка 10^{-13} — 10^{-12} см. Стоит, скажем, двум протонам оказаться разнесенными на расстояние, большее чем 10^{-11} см, как поле сильных взаимодействий перестает быть заметным

и остается электромагнитное взаимодействие, которое растолкнет протоны в разные стороны.

Истинное устройство атомных ядер прояснилось позже устройства атома. Поэтому удалось обойтись без вопросов типа: почему нуклоны, притягиваясь столь сильно, не падают друг на друга? Они не падают друг на друга по той простой причине, что не могут оказаться в одной и той же точке пространства. Устройство ядра в той же степени, как и устройство атома, вытекает из соотношения неопределенностей. Каждый нуклон и все они, вместе взятые, занимают определенное пространство. Нуклоны массивнее электронов, обладают гораздо большей энергией и, следовательно, большим количеством движения. Поэтому пространства им нужно значительно меньше, чем электронам (произведение из неопределенности координаты на неопределенность количества движения не может быть меньше постоянной Планка, помните?). Радиус атомного ядра равен примерно $1,4 \cdot 10^{-13}$ см умножить на корень кубический из общего числа нуклонов. Эта цифра хорошо совпадает с тем, что было измерено еще Резерфордом.

Нуклоны в ядре обладают количеством движения. Но опять-таки ученые на этот раз избавились от необходимости рассуждать о том, по каким таким орбитам движутся нуклоны: в ядре и места нет для движения по орбитам. Остается еще раз признать, что двигаться это совсем не означает быть сейчас здесь, а через некоторое время — в другом месте, как мы считаем на основе повседневного опыта.

Строим ядро

Строить ядро вы можете точно так же, как в свое время строили атомы. Пусть у вас есть какое-то количество протонов и нейтронов, собранных в одном месте, и попробуйте подтащить туда еще один протон. Сначала это довольно трудно, потому что при переноске протонов вам противодействует сила электромагнитного отталкивания. Стоит, однако, перейти заветный рубеж 10^{-11} см, как протон вырвется у вас из рук и устремится к своим собратьям. При этом с лихвой компенсируются ваши труды по преодолению действия электромагнитного поля и совершается еще довольно большое количество работы. Да-да, последние ферми (в атомной фи-

зике принята единица расстояния 1 Ф , равная 10^{-13} см) протон проходит под действием притяжения со стороны других нуклонов и, следовательно, выполняет работу.

Но если совершена работа, значит, суммарная энергия нуклонов в ядре должна быть меньше, чем энергия тех же нуклонов, разнесенных на большие расстояния друг от друга? Так и есть. Разность между суммарной энергией нуклонов, находящихся на больших расстояниях друг от друга, и суммарной энергией тех же нуклонов, составляющих ядро, называют дефектом массы, или энергией связи нуклонов в ядре. На один нуклон приходится энергия связи, близкая к 8 МэВ . Это энергия именно связи, поскольку, для того чтобы извлечь нуклон из ядра, противодействуя при этом сильным взаимодействиям, нужно затратить 8 МэВ . Сравните: энергия связи электрона в атоме составляет около 10 эВ , т. е. примерно в миллион раз меньше.

Помните ваше путешествие с протоном? Так и хочется уподобить его походу в горы. Сначала вы как бы поднимаетесь в гору, преодолевая взаимное отталкивание положительных зарядов протона и ядра. Вот наконец достигнут заветный перевал. На перевале протон обладает самой большой энергией, поскольку к той энергии, которую он имел, находясь на бесконечном расстоянии от ядра, прибавилась энергия, полученная из работы, затраченной на преодоление электромагнитного взаимодействия. Пройдя через перевал, протон скатывается, как на горных лыжах. При этом он выполняет работу и, следовательно, тратит запас энергии. По обе стороны от перевала энергия протона меньше, чем на самом перевале. Этот перевал в физике называется потенциальным барьером. Говорят также, что нуклоны в ядре находятся в потенциальной яме. Слово «потенциальный» означает здесь, что потенциальная энергия нуклона, находящегося в пределах ядра, меньше потенциальной энергии нуклона, находящегося на вершине перевала, т. е. на расстоянии около 10^{-11} см (десятки ферми) от точки, которую условно принимают за центр ядра.

Может ли протон самопроизвольно покинуть ядро? Рассуждения с позиций классической физики приводят нас к однозначному выводу: это невозможно. Находясь в ядре, протон испытывает притяжение со стороны других протонов. Кроме того, он движется, т. е. обладает кинетической энергией. Но энергия связи, равная 8 МэВ ,

как раз свидетельствует о том, что силы притяжения во много раз превышают силы инерции. Поэтому вопрос о протоне эквивалентен следующему вопросу. Пусть на земле стоит гирия массой 1 кг. Такая гирия испытывает силу земного притяжения около 10 Н. Вы потянули эту гирию вверх с силой 1 Н. Поднимется ли она в воздух? Жизненный опыт наш утверждает, что такого не бывает.

Попробуем рассуждать с позиций современной физики. Противоречит ли выход протона из ядра каким-нибудь запретам? Вопрос важный, и потому остановимся на нем подробнее. Находясь в ядре, протон обладает некоторым запасом энергии. На границе ядра, или, как мы говорили, на перевале, энергия этого протона на 8 МэВ больше. Но затем она опять станет меньше. По ту сторону перевала снова спуск, только более пологий. Значит, вполне возможно, что на большом отдалении от ядра протон обладает той же энергией, которой он обладал, находясь в ядре. Следовательно, самопроизвольный выход протона из ядра закону сохранения энергии не противоречит. Поразмыслив, вы сообразите, что не противоречит он и другим законам сохранения. Раз так, то ничто не мешает протону покинуть ядро. Можно все, кроме того, что нельзя. Иное дело, что такие события происходят с различной вероятностью. Математический аппарат квантовой физики в основном занимается подсчетом таких вероятностей.

Изотопы

Существует несколько элементов и изотопов, объединяемых под общим названием «радий». Радий С имеет всего 214 нуклонов, из них 83 протона. Распад радия С может происходить двумя путями. В первом случае ядро радия С расстается с одним электроном (такое тоже возможно — испускание электронов называется бетараспадом) и превращается в другой элемент — радий С', имеющий 214 нуклонов, из которых 84 протона. Испускание электрона ядром всегда сопровождается увеличением на единицу атомного номера и, следовательно, смещением элемента на одну клеточку в таблице Менделеева вправо — это правило смещения.

Во втором случае ядро радия С испускает альфа-частицу и превращается в радий С'', имеющий 210 нуклонов, из которых 81 протон. Испускание альфа-части-

цы сопровождается уменьшением атомного номера на 2 и смещением элемента на две клеточки влево в таблице Менделеева.

Все эти факты служат экспериментальным подтверждением того, что отдельный протон или альфа-частица может покинуть ядро, хотя их энергия ни в какой момент не превышает потенциального барьера. Протон как бы прорывает туннель в потенциальном барьере. Такие явления и называют туннельным эффектом. Туннельный эффект совершенно невозможен с позиций классической физики, тем не менее наблюдается он довольно часто. Вероятность самопроизвольных распадов атомных ядер измеряют периодом полураспада, т. е. промежутком времени, в течение которого распадается ровно половина от первоначально взятого количества ядер.

Период полураспада радия C' равен всего 10^{-6} с, т. е. одной миллионной доле секунды. Период полураспада радона составляет 3,8 суток. А период полураспада урана-238 равен $4,4 \cdot 10^9$ лет. Есть элементы, распадающиеся еще медленнее. Например, период полураспада тория составляет $1,8 \cdot 10^{10}$ лет, рубидия — $4,3 \cdot 10^{11}$ лет, самария — $1,2 \cdot 10^{12}$ лет и, наконец, калия — $1,3 \cdot 10^{13}$ лет. Вы, наверное, не знали, что обычный калий — радиоактивный элемент. Не знали потому, что распадается он весьма медленно и заметить его распад можно при наличии очень точных приборов и в результате длительных наблюдений.

Снова лесенка

Почему периоды полураспада так сильно отличаются друг от друга? Дело в том, что нуклоны в ядре, как и электроны в атоме, не могут принимать любые значения энергии. Как для электрона в атоме, для нуклона в ядре имеется лесенка разрешенных уровней. Мы снова сталкиваемся с универсальностью законов квантовой физики. Среди различных уровней, опять-таки как и для электронов в атоме, имеются уровни, соответствующие основным и возбужденным состояниям ядра. Но есть и отличия.

Возбужденный электрон в атоме всегда может перейти в основное состояние, излучив квант энергии. В ядре при определенных конфигурациях возможны лишь возбужденные состояния. Такие ядра называются возбу-

жденными. Перейти в основное состояние, т. е. в состояние с меньшей энергией, возбужденное ядро может, расставшись либо с несколькими протонами, либо с электроном. Этот переход и называется радиоактивностью. Чем больше возбуждено ядро, тем с большей вероятностью совершается его распад. Какие ядра самые устойчивые? Те, у которых выдерживается определенное соотношение между количествами протонов и нейтронов.

Легкие ядра — такие, у которых протонов примерно столько, сколько нейтронов, а тяжелые ядра — такие, у которых протонов немного меньше, чем нейтронов.

Но особенно важно четное или нечетное число протонов и нейтронов. Самые стабильные ядра те, у которых и число протонов и число нейтронов четное. Их называют четно-четные. Пример — уран: число протонов — 92 (четное), число нейтронов — 146 (тоже четное). Менее стабильны четно-нечетные и нечетно-четные ядра. Наконец, самые нестабильные ядра те, у которых и число протонов и число нейтронов нечетное. Вот и получается, что примерно из девятисот известных на сегодня ядер (как разбухла таблица Менделеева!) только 280 являются стабильными.

Туннели и капли

Несутся по шоссе автомобили. Мы так давно не возвращались на шоссе, с которого начали наше путешествие, что читатель, возможно, забыл о нем. Но эта дорога незримо присутствует в нашем повествовании. Что же другое, как не хребты Родоп, навевали нам образ потенциального барьера? Вернемся, однако, в машину, несущуюся по автостраде. Рокошет двигатель, и высокооктановый бензин превращается в нем в выхлопные газы. Затрачивается высококачественная, как мы установили в прошлой главе, химическая энергия. Но на что затрачивается? Ведь хорошо известно, что при перемещении тела по горизонтали без трения из пункта А в пункт Б никакой работы не совершается. Иное дело, если машина идет на подъем.

Интересно, есть ли среди наших читателей приверженцы классической физики? Наверное, есть. Строгий рецензент по поводу нашего замечания о простоте квантовой физики считает, цитируем: «Спрашивается, для кого эти науки (имеется в виду квантовая физика.—

А. и Т. Ш.) так уж просты? Специалисты высшей квалификации до сих пор спорят и не приходят к единому мнению по самому «простому» разделу «простой» классической физики — механики». Не знаем, о чем спорят механики высшей квалификации, но для приверженцев классической физики сейчас самое время задать нам каверзный вопрос.

— Вы утверждаете, что законы квантовой физики едины и в микромире и в макромире. Но тогда почему автомобилю все-таки приходится напрягаться на подъемах, вместо того чтобы туннельно просочиться сквозь гору?

Вопрос справедливый, но и ответ на него недвусмыслен. Автомобиль не может просочиться туннельно сквозь гору по той простой причине, что такого объекта «автомобиль» на самом деле не существует. Есть множество атомов, образующих автомобиль и состоящих из электронов и ядер, состоящих, в свою очередь, из нуклонов. Каждый атом живет своей жизнью, и если вы хотите описывать поведение автомобиля как единого целого, что вам остается делать? Рассматривать не реальные процессы, происходящие с реальными атомами, а пользоваться средними по множеству атомов величинами. Конечно, для средних величин и законы иные. Именно в силу того, что поведение каждого атома подчиняется законам случая, они не могут все вместе одновременно вести себя одинаково. Мысленная точка — центр масс автомобиля — сквозь гору не просачивается.

Простите нас за это маленькое отступление, поводом к которому явились высказывания строгого рецензента. Так на что тратится энергия топлива, сжигаемого в автомобильном двигателе? Она тратится на преодоление трения и сопротивления воздуха. Преодоление сопротивления воздуха составляет довольно большую часть общих энергетических затрат, поэтому кузову автомобиля, как правило, придают специальную форму. Особенно это заметно у автомобилей гоночных.

Интересно, как вы представляете себе форму тела, наилучшим образом проникающего сквозь плотную среду? Атмосфера при больших скоростях — среда достаточно плотная, недаром она удерживает самолет, весящий несколько десятков тонн. Ну что вам тут же приходит в голову? Наверное, известная поговорка «входит как нож в масло». Сразу представляешь себе острое

ножа. А известно ли вам, что большие куски масла в продовольственных магазинах ножами не режут, да это и невозможно. Вместо ножей используют тонкую струну с двумя ручками на концах.

Автомобиль не исключение. Если форма автомобиля напоминает нож, то только нож, повернутый острием назад. Если двигать в атмосфере тело, острое спереди и тупое сзади, то позади этого тела образуется разрежение, так как струи воздуха не успевают заполнять его. Этот вакуум препятствует движению в гораздо большей степени, чем то, что называют лобовым сопротивлением. Поэтому так называемые обтекаемые тела имеют форму капли, падающей в атмосфере,— толстую спереди и заостренную на конце.

Капля дождя способна деформироваться и принимать форму, наиболее удобную для преодоления сопротивления воздуха. Но почему капля остается каплей, а не разбивается, особенно при преодолении атмосферного сопротивления, на более мелкие капельки или даже отдельные молекулы? Капля остается каплей благодаря поверхностному натяжению. Но разве поверхность воды обладает какими-то особыми свойствами, отличными от свойств той же воды в капле? Нет, здесь дело в другом. Просто молекулы в капле обладают меньшей энергией, чем те же молекулы на свободе. Капля воды окружена потенциальным барьером, как атом или атомное ядро.

Вам теперь понятно, зачем мы сделали экскурс в область автомобилей? Капля воды в равной степени может служить прообразом и автомобиля и атомного ядра. Интересная подробность. При окончании университета Нильсу Бору в качестве выпускной (мы бы сказали, дипломной) работы предложили исследование поверхностного натяжения жидкости. Наверное, поэтому много лет спустя Бор первым придумал капельную модель ядра. Модель, которая верно служит физикам и по сей час.

Похоже, что мы наконец разобрались, как происходит распад ядра урана. Когда вблизи ядра урана-235 оказывается нейтрон, обладающий подходящей энергией, он захватывается ядром. Этот захват сам по себе чрезвычайно интересен. Происходит он как угодно, но не потому, что нейтрон двигался в направлении ядра или, иначе, нейтроном выстрелили в ядро. Здесь совершенно не годится образ кирпича, в который попадает пуля. Захват нейтрона происходит в результате некоего внутреннего

сродства нейтронной волны и «частоты», на которую настроено ядро. Явление это чисто квантовомеханическое. Так или иначе, но нейтрон захватывается, и количество нуклонов в ядре увеличивается на единицу.

«Все понятно! — скажете вы. — Только что захваченный нейтрон и представляет собой как бы последнюю каплю, переполняющую чашу». Скажете, и будете неправы. После захвата нейтрона структура ядра меняется. Ядро оказывается менее стабильным. Менее стабильное (возбужденное) ядро затем распадается самопроизвольно, причем распад происходит через некоторое время после захвата нейтрона. Этот промежуток времени достаточно мал по нашим масштабам и в то же время достаточно велик по масштабам атомов. Как говорил Нильс Бор, за этот промежуток времени ядро успевает забыть о захваченном нейтроне. Оно распадается точно так, как распадалось бы обычное ядро изотопа урана, уран-236. Снова можно сказать, что здесь действуют те же законы, что и законы, по которым возбужденный электрон в атоме возвращается в основное состояние, излучая квант электромагнитной энергии.

Разные ядра

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, различна у различных элементов. Самая маленькая энергия связи у нуклонов ядра дейтерия — тяжелого изотопа водорода, состоящего из одного протона и одного нейтрона. Энергия связи здесь равна всего 1,09 МэВ. Энергия связи у ядра трития 2,78 МэВ. Следующим идет гелий, у которого энергия связи, приходящаяся на один нуклон, равна 7,03 МэВ. Для всех ядер со средними атомными весами энергия связи на один нуклон имеет приблизительно одно и то же значение, равное 8,9 МэВ. При дальнейшем увеличении атомных весов энергия связи уменьшается, достигая у урана величины 7,5 МэВ.

Попробуем сделать вывод о том, как должны протекать реакции деления ядер. Пусть, например, ядро урана расщепляется на два осколка примерно одинаковой массы. У этих осколков энергия связи выше, а следовательно, полная энергия каждого нуклона ниже, чем полная энергия тех же нуклонов в ядре урана. Значит, расщепление ядра урана должно сопровождаться выделением энергии. Так происходит на самом деле. Это мы знали

и раньше, но только теперь получили возможность до конца разобраться в сути происходящего.

Наоборот, у легких элементов энергия связи увеличивается с увеличением атомного номера. Поэтому при расщеплении, например, ядра гелия на два ядра дейтерия никакая энергия не выделяется. Получаются два ядра с меньшей энергией связи и, следовательно, большей полной энергией нуклонов. Реакция расщепления ядер гелия — реакция эндотермическая. При расщеплении ядер элементов с атомными номерами примерно от 30-го до 75-го энергия не выделяется и не поглощается. Это, конечно, в среднем. А вообще возможны исключения из такого правила, поскольку у каждого элемента есть изотопы и ядра этих изотопов могут быть более или менее возбужденными, т. е. располагать большими или меньшими дополнительными запасами энергии.

Чтобы завершить наше знакомство с миром атомных ядер, вернемся к природе сильных взаимодействий. Итак, существует поле сильных взаимодействий. В свое время мы определили поле как пространство, в каждой точке которого действует сила. Правда, мы высказывали сомнения в правомочности самого понятия силы. Эти сомнения должны еще более укрепиться после знакомства с тем, что происходит в ядре. Если на каждый нуклон действует сила притяжения к другим нуклонам, то почему эта сила не удерживает нуклоны в ядрах радиоактивных элементов? Не говоря уже о том, что по самому своему определению каждая сила должна иметь точку приложения, а применительно к нуклонам понятие точки не имеет смысла.

Ранее в этой книге мы рассматривали электромагнитное и гравитационное поля как потоки частиц — квантов или фотонов. Подобная точка зрения позволила нам ответить на много вопросов и, в частности, понять, как отдельные объекты могут действовать друг на друга на расстоянии. Представление о фотонах позволило ответить на вопрос о том, почему энергия передается от одного объекта к другому только целыми порциями.

Попробуем сейчас развить те же идеи применительно к ядрам и нуклонам. При этом надо иметь в виду следующее. Энергия сильного взаимодействия в миллионы раз превышает энергию электромагнитного взаимодействия, не говоря уже о гравитационном. Но если так, гипотетические частицы — переносчики сильного взаимодейст-

вия — должны обладать относительно большой энергией. Откуда она может взяться, ведь энергия нуклонов вроде бы не меняется? Нет ли здесь нарушения закона сохранения энергии?

Такого нарушения не усматривается, если вспомнить, что энергия подчиняется соотношению неопределенностей. В одной из формулировок соотношения неопределенностей утверждается, что произведение неопределенности величины энергии и неопределенности в величине времени не может быть меньше постоянной Планка. Отсюда следует, что если частицы — кванты сильного взаимодействия — живут очень недолго, иначе говоря, если произведение времени их жизни и их энергии примерно равно постоянной Планка, то они могут рождаться и исчезать, не нарушая закона сохранения энергии.

Из сказанного можно сделать еще один вывод. Если кванты сильного взаимодействия живут очень недолго, то, даже двигаясь со скоростями, близкими к скорости света, они могут перемещаться только на небольшие расстояния. Это значит, что сильное взаимодействие проявляется лишь на малых расстояниях. Подобный вывод блестяще подтверждается тем, что мы знаем о поведении нуклонов.

Примерно так рассуждал японский ученый Хидеки Юкава. В 1935 году он закончил расчеты, из которых следовало, что гипотетические частицы — кванты сильных взаимодействий — должны обладать массой (напомним, масса эквивалентна энергии), примерно в 200 раз большей массы электрона. Юкава назвал эти частицы мезонами, т. е. средними, имея в виду, что масса мезона находится где-то посередине между массой электрона и массой нуклона. Очень долго гипотеза Юкавы не получала экспериментального подтверждения и, следовательно, оставалась гипотезой. В 1947 году английский физик С. Ф. Пауэлл и его сотрудники обнаружили в космических лучах частицы массой, примерно в 270 раз большей массы электрона. Эти частицы называли пи-мезонами, или, короче, пионами. Скоро выяснилось, что пионы представляют собой частицы, предсказанные Юкавой.

Согласно современным представлениям, атомное ядро состоит из нуклонов и пионов. Каждый раз, когда нуклон приближается к границе ядра, он испускает пион

и меняет направление своего движения. Испущенный пион поглощается каким-либо другим нуклоном. Существует каждый пион в течение столь краткого промежутка времени, что рождение и исчезновение пионов не выводит баланс энергии за рамки, устанавливаемые соотношением неопределенностей.

Все сказанное служит прекрасным примером того, в какой степени понятия «движение» и «направление движения» не соответствуют реально происходящему с нуклоном. Каждый раз, когда мы произносим подобную фразу, мы делаем очередную попытку описать в привычных терминах то, что в этих терминах описано быть не может. Гораздо правильнее было бы сказать, что рождение и поглощение пиона, или обмен пионами, препятствует тому, чтобы нуклоны покидали некоторую область пространства.

Атомная электростанция

Мы достаточно узнали о ядре и приступаем теперь к решению основной задачи этой главы — описанию атомной электростанции. Скажем сразу: изотоп уран-235 не годится в качестве топлива для такой электростанции. Не годится из-за сложности его выделения из смеси, а значит, высокой стоимости.

Если бы удалось построить атомную электростанцию с топливом в виде чистого урана-235, то энергия такой станции стоила бы фантастически дорого. Поступают иначе. В качестве топлива используют природный уран со всеми содержащимися в нем изотопами. А чтобы заставить участвовать в реакции все имеющиеся в топливе атомы урана-235, излучаемые при делении ядер нейтроны искусственно замедляют, пропуская их через какое-либо вещество, например через графит. Попадая в графит, нейтроны не захватываются ядрами углерода и после многократных взаимодействий снижают свою энергию. В результате резко увеличивается вероятность захвата нейтронов ядром урана-235.

Выглядит все это следующим образом. Между урановыми блоками размещают стержни замедлителя нейтронов — графита. Стержни можно поднимать и опускать. Настраиваются они так, чтобы получить требуемую скорость реакции. Если скорость реакции почему-либо увеличивается — стержни автоматически опускаются, ско-

рость реакции уменьшается — стержни поднимаются. Автомат управления стержнями — неотъемлемая составная часть всякого атомного реактора.

Реакция деления ядер урана-235 происходит в основном по такой схеме. Ядро захватывает нейтрон и распадается на два осколка: ядро изотопа ксенона со 139 нуклонами и ядро изотопа стронция с 95 нуклонами. Кроме того, в результате деления образуются два нейтрона, которые после замедления используются для поддержания цепной реакции. Ядро стабильного изотопа ксенона содержит 136 нуклонов, ядро стабильного изотопа стронция — 88 нуклонов. Получающиеся в результате деления осколки обладают большим избытком нейтронов и, следовательно, неустойчивы. Они испытывают несколько последовательных бета-распадов, в результате которых ксенон превращается в стабильный изотоп лантана.

Что происходит с ядрами изотопа уран-238, из которых на 99 % состоит ядерное горючее? Ядро урана-238 не делится, но оно может захватить нейтрон и превратиться в изотоп уран-239. Этот изотоп бета-радиоактивен с периодом полураспада 23 мин. После испускания электронов уран-239 превращается в трансурановый элемент нептуний с атомным номером 93. Нептуний не существует в природе, и впервые его получили в лаборатории в процессе опытов по облучению урана нейтронами. Нептуний бета-радиоактивен с периодом полураспада 2,4 дня. В результате испускания электронов ядро нептуния превращается в ядро еще одного трансуранового элемента — плутония с атомным номером 94. Плутоний также отсутствует в природе.

Ядра плутония делятся под воздействием нейтронов. Это чрезвычайно важное обстоятельство. При работе атомного реактора, кроме энергии, образуется плутоний. Плутоний химически отличается от урана и выделить его относительно просто, поэтому атомный реактор, кроме основного назначения быть источником энергии, может использоваться для получения атомного топлива. Наконец, плутоний альфа-радиоактивен с периодом полураспада 24 000 лет. После испускания альфа-частицы ядро плутония превращается в ядро урана-235. Круг, как говорят, замыкается.

В реакции, происходящей в атомном реакторе, участвует меньше 1 % от общего количества топлива, но мощность атомного реактора огромна. Огромна потому, что

при делении каждого ядра урана-235 выделяется около 150 МэВ энергии. Эта энергия частично выделяется в виде электромагнитных квантов, частично передается осколкам, т. е. веществу топлива, и наконец, частично ее уносят нейтроны. Замедляясь в графите, нейтроны отдают ему свою энергию. В результате и урановые блоки, и графитовые стержни при работе реактора нагреваются, поэтому реактор должен работать в условиях непрерывного охлаждения. В качестве охладителя обычно используют воду. Она выносит тепло из реактора и передает его потребителям — чаще всего турбинам электростанции.

В предыдущих главах мы ввели понятие о качестве энергии и договорились, что качество энергии считается тем выше, чем более упорядоченными представляются нам ее источники. Наметился такой ряд: тепловая энергия (качество самое низкое), механическая энергия (качество несколько выше), электрическая и химическая энергия (качество выше, чем механической).

Зная, сколь велика мощность ядерных реакторов, сразу хочется поставить атомную энергию еще выше по этой шкале. Но дело обстоит далеко не так. Реакции деления происходят хаотически, не говоря уж о том, что делится меньше 1% атомов топлива. Если бы к атомному реактору было применимо понятие коэффициента полезного действия, то мы вынуждены были бы констатировать, что коэффициент этот весьма низок. В чем же секрет больших мощностей? Он заложен, если можно так выразиться, в высокой теплотворной способности ядерного горючего.

Важно и то, что, кроме энергии, атомные реакторы производят чрезвычайно ценные и отсутствующие в природе, но нужные промышленности изотопы различных веществ. Мы описали одну из реакций. На самом деле в атомном реакторе параллельно их протекает несколько.

Тепло из тепла

Есть еще один способ получения ядерной энергии. Помните, у легких ядер энергия связи увеличивается с увеличением атомного номера? Если у дейтерия энергия связи равна 1,9 МэВ на нуклон, то у гелия она оказывается равной 7,03 МэВ на нуклон. Казалось бы, до чего просто! Ведь каждое ядро дейтерия состоит из одного

протона и одного нейтрона. Соединяем их вместе и получаем ядро, содержащее два протона (заряд 2) и два нейтрона, т. е. всего 4 нуклона. Каждый нуклон уменьшит свою энергию (энергия связи увеличится) примерно на 6 МэВ, т. е. всего выделится 24 МэВ.

Не правда ли, здорово? Пусть даже выделятся не все 24 МэВ, а несколько меньше, мы согласны и на меньшее. Главное — все так просто. Не надо никаких нейтронов да еще со строго определенной энергией, не надо образовывать никакую критическую массу — объединяем ядра, и готово. Правда, откуда брать дейтерий? В природной воде дейтерия содержится меньше, чем урана-235 в природном уране. Но зато воды на Земле гораздо больше, и вода, конечно, дешевле урана.

Может, в наших рассуждениях что-нибудь не так? Чтобы проверить себя, посмотрим с другой стороны. Есть все основания полагать, что на Солнце происходят следующие реакции. Два протона объединяются друг с другом и образуют ядро изотопа гелия с атомным весом 2. Это ядро неустойчиво, оно тут же испытывает так называемый бета-плюс-радиоактивный распад, т. е. испускает позитрон и нейтрино впридачу и превращается в ядро дейтерия с зарядом 1 и атомным весом 2. Это ядро снова объединяется с протоном, в результате образуется ядро изотопа гелия с зарядом 2 и атомным весом 3. При этом испускается квант электромагнитной энергии. Наконец, два ядра изотопа гелия с атомным весом 3 реагируют между собой, в результате образуется одно ядро обычного гелия с атомным весом 4 и два ядра водорода, т. е. все начинается сначала.

В ходе каждой реакции выделяется энергия. Это и есть энергия Солнца, часть которой достается нам с вами. Но если так происходит на Солнце, почему то же самое не происходит на Земле? Почему находящийся на Земле водород давно не вспыхнул, а Земля не превратилась в небесное светило? Потому что, для того чтобы два протона могли объединиться, они должны подойти друг к другу на достаточно близкое расстояние. А этому мешает электромагнитное отталкивание одноименных электрических зарядов. Что показывают расчеты? Чтобы сблизить два протона и дать им возможность объединиться, нужно затратить 0,7 МэВ энергии, по 0,35 МэВ на каждый протон. Энергии 0,35 МэВ соответствуют $2 \cdot 10^9$ К.

Как видите, все довольно просто. Нужно взять водород, нагреть его до каких-нибудь 2 млрд. градусов, и готово — началась термоядерная реакция. Термоядерная потому, что реакция объединения ядер протекает при исключительно высокой температуре. Заметьте, необходим только начальный нагрев. Когда реакция началась, выделяющейся при объединении ядер энергии более чем достаточно для поддержания ее. Еще образуется и избыток энергии. Поэтому описанная реакция происходит как взрыв, термоядерный взрыв колоссальной силы.

Итак, не следует без нужды нагревать водород до температуры 2 млрд. градусов. Более подробный анализ показывает, что не надо и 2 млрд. Во-первых, температура определяет среднюю энергию частиц, в данном случае протонов. Если средняя энергия равна некоторой величине, наверняка встретятся частицы с энергией, в несколько раз превышающей среднюю. А нам только и надо, чтобы реакция началась, дальше все пойдет само собой.

Другая причина — туннельный эффект. Один протон может объединиться с другим, «прорыв» себе туннель под потенциальным барьером. Правда, на этот раз туннель будет создаваться не изнутри, а, наоборот, снаружи. Теоретические расчеты говорят, что реакция термоядерного синтеза в водороде начнется уже при температуре 10 млн. градусов Кельвина.

Водородная бомба — самое страшное оружие из всего, что когда-либо было придумано человеком, — устроена очень просто. Некоторое количество смеси дейтерия и трития поджигается взрывом урановой атомной бомбы. Температура поднимается до 10 млн. градусов, а дальше самопроизвольно идет реакция объединения одного ядра дейтерия и одного ядра трития в одно ядро гелия с атомным весом 4. При этом излучается один нейтрон. При такой реакции выделяется 17,7 МэВ энергии, т. е. около 3,5 МэВ на нуклон. Для сравнения скажем, что при делении ядра урана выделяется 0,85 МэВ на нуклон. При этом количество реагирующего вещества ничем не ограничено. Не ограничена и мощность водородной (термоядерной) бомбы.

Термоядерную бомбу мы описали для того, чтобы выявить особенности протекания термоядерных реакций. Но нас интересуют не бомбы, а различные способы получения энергии, приносящей пользу человеку. Из того, что было сказано, ясно одно: осуществление управляемой термоядерной реакции связано с большими трудностями. Прежде всего в больших количествах водорода или другого термоядерного горючего термоядерная реакция всегда протекает в виде взрыва. Поэтому одновременно в реакции должно участвовать относительно небольшое количество горючего. Но тогда нельзя рассчитывать на самоподдержание реакции, и горючее надо все время подогревать.

Это бы еще полбеды. Энергия, затраченная на подогревание, вернется к нам с лихвой. Хуже другое. Водород, нагретый до температуры в десятки миллионов градусов, не удержишь ни в каком сосуде. Из чего бы ни были сделаны стенки такого сосуда, они мгновенно испарятся. А водород при соприкосновении со стенками охладится, и реакция прекратится.

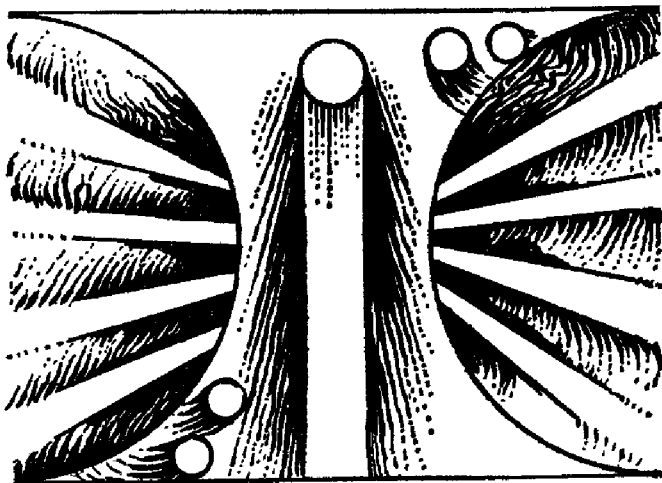
Посмотрите на экран телевизора. Наверное, все знают, что изображение на экране телевизора «рисует» тончайший пучок электронов. Электроны вылетают из одного раскаленного катода или из трех катодов (у цветной телевизионной трубки). В пучок диаметром несколько долей миллиметра их собирает магнитное поле, образующееся в фокусирующей системе. Эта же идея используется в созданной в нашей стране установке «Токомак» для управляемого термоядерного синтеза. При температуре 100 млн. градусов все атомы теряют свои электроны и водород превращается в плазму, содержащую только заряженные частицы. С помощью магнитного поля эти частицы собирают в пучок или тонкий шнур, который не соприкасается со стенками сосуда. Но электронный пучок в телевизоре в конце концов упирается в экран. Чтобы такого не случилось с электронным шнуром, сосуд, в котором он образуется, имеет форму тора — баранки без начала и без конца. До нужной температуры плазменный шнур нагревается электрическим током. В последнее время начали использовать для разогрева плазмы лазеры, о которых речь пойдет в следующей главе.

На установках «Токомак» в нашей стране и в США выполнено много успешных наглядных экспериментов. Но к сожалению, до промышленного освоения управляемого термоядерного синтеза еще очень далеко. Плазменный шнур неустойчив, да и нагреть его до температуры 100 млн. градусов (все-таки 100 млн.!) не так-то просто. Ученые, однако, не теряют надежды. А как заманчиво! Освоив термоядерный синтез, мы получим в полном смысле этого слова неисчерпаемые запасы энергии. Важно и то, что продуктом реакции термоядерного синтеза является обычный, не радиоактивный гелий.

Подводя итоги, скажем, что атомная энергия очень напоминает химическую. И та и другая выделяются в результате реакций. И в том и в другом случае количество выделяемой энергии равно разности между энергетическими уровнями исходных веществ и продуктов реакций. Наконец, и в том и в другом случае выделение энергии происходит в достаточной мере беспорядочно.

ГЛАВА 6

Энергия высшего качества



Солнечный зайчик

Приятно проснуться тихим солнечным утром от того, что по щеке скользнул солнечный зайчик. Тот самый солнечный зайчик, который, как говорится в одной песенке, не линяет даже весной, когда линяют всякие звери. Крохотным осколком зеркала можно запустить солнечный зайчик, например, в окно к приятелю. Солнечные зайчики — один из самых древних способов передачи информации. Но вот беда! Солнечный зайчик, а в общем случае строго параллельный пучок световых лучей любого происхождения, получить легко лишь в том случае, если расстояние невелико. На больших расстояниях пучок обязательно расходится и световой луч имеет форму конуса.

Чтобы получить малорасходящийся световой пучок, пользуются зеркалами различной формы. Зеркальная поверхность, представляющая собой параболоид вращения, собирает световые лучи, исходящие от точечного источника, помещенного в фокус параболоида, в строго параллельный пучок. На этом принципе строятся отражатели мощных прожекторов и карманных фонариков. И снова беда в том, что, во-первых, не существует точечных источников света, а во-вторых, не существует зеркал

с идеальной поверхностью. Поэтому даже луч прожектора всегда расходится.

Откуда вообще берутся световые лучи? Чем объясняются законы их преломления и отражения? Причиной появления света всегда являются электроны, входящие в состав атомов и молекул. Вы знаете, что ядра и электроны в атомах связываются между собой электромагнитными полями, образуя сложную систему. Система эта обладает запасом энергии, складывающимся в основном (если не считать внутриядерной энергии) из энергий отдельных электронов. Энергия электрона в основном сосредоточена в его электромагнитном поле. Поля отдельных электронов складываются, значит, складываются и их энергии. Поэтому правильнее говорить, что энергией обладает весь атом, точнее, его электромагнитное поле, хотя при различных расчетах иногда удобнее учитывать вклад каждого электрона по отдельности.

В чем состоит главное свойство атома? Его энергия квантуется. Она не может быть любой, а всякий раз принимает одно из некоторых значений — уровней. Значение энергии определяет состояние атома. Все это справедливо и для молекул, но молекулы — системы более сложные, они могут принимать больше различных состояний, а правила, по которым определяют, какие состояния возможны, а какие нет, гораздо мудренее.

Большую часть времени атом проводит на основном уровне. Существуют возбужденные уровни, на которых энергия электрона больше, чем на основном. Переход атома из основного состояния в возбужденное происходит под воздействием какой-либо внешней причины. Напротив, из возбужденного состояния в основное атом может перейти сам по себе. При переходе с одного из возбужденных уровней на основной или вообще с высшего на низший уровень энергия атома уменьшается. Но конечно, она не исчезает бесследно. Энергия либо передается соседним атомам, либо выделяется в форме кванта электромагнитных колебаний. Энергия этого кванта равна разности энергий атома до и после перехода. Такую порцию электромагнитных колебаний называют фотоном. Частота колебаний фотона пропорциональна энергии. Это еще один из фундаментальных законов нашего мира. Значит, надо атом сначала перевести на возбужденный уровень, а затем он уже сам перейдет на основной с излучением кванта электромагнитных колебаний.

Как перевести атом в состояние с большей энергией (на более высокий уровень)? Есть много разных способов. Можно сообщить атомам тепловую энергию, как в керосиновой или электрической лампах, можно воздействовать на них электронами (экран телевизора), световыми квантами (светящиеся краски). Атомам можно передать энергию, выделяющуюся при протекании химической реакции (светлячок) и многими другими способами. Выждав некоторое время, атом сам по себе (спонтанно) возвращается на один из более низких уровней и излучает фотон. Такой фотон необязательно является фотоном видимого света, но это уже детали. Важно, что энергия фотона всегда равна разности энергии атома до и после перехода.

Каждый фотон вылетает в определенном направлении и уносит с собой не только порцию энергии, но и порцию количества движения, или импульс. Импульсы, так же, как и энергия, подчиняются законам сохранения, поэтому атом, испустивший фотон, обязательно приобретает дополнительный импульс (так называемый импульс отдачи), равный по величине и противоположный по направлению импульсу испущенного фотона. Все происходит как при выстреле из ружья, которое «отдает» в плечо. При спонтанном излучении направление, в котором испускается фотон, совершенно случайно. Именно поэтому в подавляющем большинстве случаев свет излучается источником во все стороны. Поскольку направления случайные, нет никаких оснований к тому, чтобы в каком-то одном направлении или вообще в какую-то сторону излучалось больше или меньше фотонов.

Эстафета

При спонтанных переходах нельзя предсказать заранее ни момент времени, когда атому вздумается перейти с более высокого энергетического уровня на более низкий, ни направление, в котором будет излучен фотон. Но кроме спонтанных переходов, возможны также вынужденные переходы. Представьте себе, как команды легкоатлетов соревнуются в эстафетном беге. Вот бегун с палочкой в руках приближается к границе этапа. Его товарищ по команде, ожидающий своей очереди, сначала совершает какие-то не совсем понятные движения, потом разбегается и почти на самой линии палочка пе-

переходит из рук в руки. Примерно то же самое происходит, когда поблизости от атома, находящегося в возбужденном состоянии, пролетает фотон, впрочем, не любой фотон, а такой, энергия которого почти в точности равна разности между энергиями возбужденного и более низкого состояний атома.

Фотон — порция электромагнитного излучения, и нет ничего необычного в том, что возбужденный атом «чувствует» его приближение заранее. Он «настраивается» определенным образом (вспомните радиоприемник). А каков результат? Под воздействием пролетающего мимо фотона возбужденный атом переходит на более низкий энергетический уровень и, в свою очередь, излучает фотон. Но не зря атом настраивался. У двух фотонов, пролетающего и излученного, одинаковыми оказываются не только энергии, а значит, и частоты, но и импульсы. Оба фотона летят строго в одном и том же направлении, как бегуны в эстафете.

Но и это еще не все. Оказывается, колебания пролетавшего фотона и колебания вновь образованного фотона совершаются в одной фазе. Что это значит? У двух волн в один и тот же момент — гребень и в один и тот же момент — впадина. Если теперь каждый из пары фотонов встретит по возбужденному атому, то произойдут два вынужденных перехода. Фотонов станет четыре. Затем их может стать восемь, шестнадцать и т. д. Все они имеют строго одинаковые значения энергии, одинаковые фазы и одинаковые импульсы, т. е. движутся как солдаты на параде в ногу и в одном направлении.

Фотоны, образовавшиеся в результате последовательных актов вынужденного излучения, образуют строго параллельный световой пучок, причем у всех фотонов пучка энергия одна и та же, а значит, одна и та же частота или, проще говоря, один и тот же цвет. Такой световой пучок называют монохроматическим. Кроме того, электромагнитные колебания у всех фотонов совершаются в одной и той же фазе. Такой световой пучок называют когерентным.

Так что же, образовать строго параллельный да к тому же еще когерентный световой пучок совсем просто? Получается, что нужно лишь располагать веществом, часть атомов которого находится в возбужденном состоянии, а потом подействовать на это вещество одним единственным фотоном с нужной энергией. Чем больший

путь пройдет фотон в веществе, тем больше образуется вторичных фотонов, тем соответственно большей оказывается мощность светового пучка. Кажется, это не слишком сложно? Беда в том, что акты вынужденного излучения — не единственное, что может натворить фотон, пролетая в веществе.

Если на пути фотона встречается атом, находящийся в основном состоянии, он заимствует энергию фотона, проще говоря, поглощает фотон и переходит в возбужденное состояние. Фотон при этом исчезает. Подобное явление так и называется поглощением. Акты вынужденного излучения и поглощения совершаются одинаково охотно, т. е. с одинаковой вероятностью. Законы вынужденного излучения и поглощения фотонов сформулировал Альберт Эйнштейн.

Что происходит в веществе на самом деле, зависит от того, каких атомов больше — возбужденных или находящихся в основном состоянии. Любой фотон, имеющий нужное значение энергии, с равной вероятностью либо послужит причиной вынужденного излучения (тогда фотонов станет два), либо окажется поглощенным (тогда не останется ни одного фотона). Если, возбужденные атомы преобладают, соответственно преобладают и акты вынужденного излучения. Вещество ведет себя как источник параллельного когерентного светового луча. А если больше атомов находится в основном состоянии? Акты поглощения преобладают над актами излучения. Вещество поглощает световые лучи, или, как мы говорим, оказывается непрозрачным.

Население электронного дома

Передавая энергию веществу, можно образовать в нем сколько угодно возбужденных атомов. Можно загонять атомы на сколь угодно высокие энергетические уровни. Но природа ленива — всякая физическая система стремится принять такое состояние, в котором ее собственная энергия минимальна. Это один из фундаментальных законов природы. Как бы вы ни нагревали вещество, количество атомов на более низком энергетическом уровне, не обязательно основном, всегда преобладает над количеством атомов, находящихся на более высоком энергетическом уровне.

Число атомов, находящихся в данном состоянии (на

данном энергетическом уровне), называют населенностью этого уровня. Представьте себе, что в электронном доме на каждом этаже сделаны полки, стеллажи, как в библиотеке. Электроны располагаются по этим полкам. Если бы вам поручили расставить по полкам книги, причем сказали, что, мол, расставьте их в любом порядке, как вы поступили бы? Конечно, сначала набили нижние полки, а потом, когда внизу все заполнилось, взбираясь по стремянке, стали бы заполнять верхние полки.

Точно так же поступает и природа. Чем ниже энергетический уровень, тем больше на нем электронов. Повышается температура — электроны перебираются на более высокие уровни (на более высокий этаж), но снова на нижних полках электронов больше, чем на верхних. В равновесном состоянии (это очень важное уточнение) на более низкой энергетической полке электронов всегда больше, чем на более высокой. Это важнейшее обстоятельство известно как распределение Больцмана.

Распределению Больцмана подчиняются не только атомы и молекулы, но любые объекты, обладающие энергией, способные взаимодействовать между собой и передавать друг другу часть своей энергии. То же самое произойдет, если вы насыпете в банку много стальных шариков и потрясите ее. Чем больше энергия шарика, тем чаще сталкивается он с другими шариками, тем «охотнее» делится с ними своей энергией. В результате большая часть шариков в банке обладает некоторой более низкой энергией.

Возьмите стержень из любого материала и поднесите один его конец к пламени горелки. В первый момент в части стержня, соприкасающейся с пламенем, образуется много «энергичных» атомов. Они сразу начинают взаимодействовать, передавая энергию другим атомам до тех пор, пока вдоль всего стержня не установится одинаковая температура, т. е. пока все атомы стержня не подчинятся распределению Больцмана.

Если изолированная система, состоящая из многих объектов, подчиняется распределению Больцмана, говорят, что она находится в состоянии равновесия. Как вывести систему из равновесия, нарушить распределение Больцмана? Подействуйте на нее извне. Но и в этом случае распределение Больцмана скоро восстановится, как у нагреваемого стержня. Система придет в равновесие, если угодно, приспособится к новым условиям.

Развивая аналогию с электронным домом, можно представить себе, что где-то случилось нечто интересное и жильцы устремляются наверх, чтобы посмотреть. Но любопытство скоро проходит, и на первом этаже их снова будет больше, чем на втором, на втором — больше, чем на третьем, на третьем — больше, чем на четвертом и т. д. Природа ленива — с этим ничего не поделаешь.

Вещество наоборот

Теперь осветите какое-нибудь вещество лучом света — направьте на него пучок фотонов. Если энергия фотонов не совпадает ни с какой разностью между двумя энергетическими уровнями, фотоны проходят сквозь вещество, не взаимодействуя с его атомами, — вещество прозрачно. А если энергия фотона оказывается достаточно близкой хотя бы к одной разности между двумя энергетическими уровнями, тогда происходят акты вынужденного излучения и акты поглощения, но поскольку менее энергичных электронов больше, актов поглощения также больше, и все фотоны рано или поздно оказываются поглощенными. Вещество непрозрачно.

Все это относится к веществу в его равновесном состоянии, к веществу, предоставленному самому себе. Наши аналогии помогли сформулировать задачу, которая известна в физике как задача получения вещества с инверсией населенностей, т. е. вещества, у которого количество жильцов верхних этажей электронного дома преобладает над количеством жильцов нижних этажей. Удачный литературный образ превратился со временем в строгий научный термин.

Как получить вещество с инверсией населенностей, иначе, активное вещество? Эта задача имеет даже не одно, не два, а множество решений. Простейшее состоит в механическом разделении возбужденных и невозбужденных атомов или молекул. Его нельзя признать самым удачным, но оно интересно тем, что привлекает то самое свойство ленивости природы, которому оно, казалось бы, должно противодействовать.

Давайте, однако, по порядку. Пусть вещество, в котором вы хотите создать инверсию населенностей, представляет собой газ, находящийся в обычных условиях. В таком газе всегда есть много возбужденных молекул и всегда количество молекул на более низких энергетиче-

ческих уровнях преобладает над количеством молекул на более высоких энергетических уровнях. С помощью насоса образуйте газовую струю и пропустите ее через сильно неоднородное электрическое поле. Электрическое поле называют неоднородным, если значения его напряженности в различных точках пространства отличаются друг от друга. Любой электрон, обладая электрическим зарядом, взаимодействует с электрическим полем — на электрон в электрическом поле действует сила, равная произведению заряда электрона и напряженности поля. А раз на электрон действует сила, значит, он приобретает дополнительную порцию энергии.

И вот тут наблюдается интересное явление, получившее название эффекта Штарка. Внешнее электрическое поле либо притормаживает электрон, уменьшая его полную энергию, либо, наоборот, подхлестывает его, увеличивая энергию. Соответственно увеличивается или уменьшается энергия всего атома. От чего это зависит? От уровня, на котором находился атом или молекула. Один и тот же атом (молекула), находясь в одном состоянии, увеличивает свою энергию во внешнем электрическом поле, а находясь в другом состоянии, уменьшает свою энергию. То же самое происходит и во внешнем магнитном поле.

Эффект Штарка дает нам возможность потягаться с природой, пользуясь ее же оружием. Каждая физическая система стремится занять состояние, в котором ее собственная энергия минимальна. Что это означает применительно к нашему случаю? Каждый атом стремится занять такое положение в пространстве, где его полная энергия минимальна. Поле неоднородно, и различным точкам пространства соответствуют различные значения напряженности. Атомы (молекулы), чья энергия увеличивается во внешнем поле, устремятся туда, где поле поменьше, а атомы (молекулы), чья энергия уменьшается во внешнем поле, — туда, где поле сильнее. Это одни и те же атомы, но находящиеся в разных состояниях.

Вот и получается, что газовая струя разбивается на несколько отдельных струек, причем в каждую струйку попадают атомы с одинаковыми значениями энергии (находящиеся в одинаковых состояниях). Все возбужденные атомы оказываются сосредоточенными в одной и той же струе. Такой метод получения инверсии населен-

ностей получил название метода механического разделения.

Теперь дело за малым. Направьте струю в воронку и соберите газ в какой-нибудь резервуар. Вещество с инверсией населенностей получено. Дальше все происходит само собой. Хотя бы в одном из атомов случается спонтанный переход, и возникающий при этом фотон служит причиной многих вынужденных переходов, т. е. образования когерентного светового пучка. Вещество с инверсией населенностей излучает одну или несколько последовательных световых вспышек до тех пор, пока бóльшая часть атомов не переходит в основное состояние или пока в веществе не установится нормальная населенность (равновесное состояние).

Совсем не обязательно ждать, пока в одном из атомов произойдет спонтанный переход. Можно направить в сосуд, содержащий вещество с инверсией населенностей (его называют активным веществом), несколько фотонов. Направите немного фотонов, а получите, во всяком случае в первые моменты времени, гораздо больше. Пользуясь повседневным языком, направите в сосуд с активным веществом слабенький световой луч — получите сильный. Это и есть не что иное, как эффект усиления.

Мазер, отец лазера

Только что описанный метод положен в основу конструкции первого мазера. Слово «мазер» представляет собой последовательность первых букв слов английской фразы, которая в переводе на русский язык обозначает «усиление микроволн за счет вынужденного излучения». Что такое вынужденное излучение, вы уже знаете. Как за счет вынужденного излучения можно усиливать, тоже знаете. Неясно только, почему микроволны? Потому что усилитель, использующий активное вещество, впервые был построен именно для микроволн, т. е. для квантов, энергия и частота которых значительно ниже, чем энергия и частота квантов, относящихся к диапазону видимых световых лучей. Активное вещество мазеров усиливало пучки излучений, относящихся к диапазону сантиметровых радиоволн.

Изобретение способов получения активного вещества послужило началом целой цепи сложных задач. Лишь

тот, кто никогда не сталкивался с инженерным творчеством, может полагать, что установление нового физического принципа сразу открывает дорогу к появлению множества физических приборов, работающих на основе этого принципа. Скорее наоборот, открытие некоего физического принципа кладет начало новым трудностям. Именно так обстояло дело и в той области науки и техники, становление которой связано с открытием метода получения и использования активных веществ и которая в дальнейшем получила название квантовой электроники.

Какие трудности? Разберемся хотя бы в самых главных из них. Перед вами сосуд со свежеполученным активным веществом. Пусть по-прежнему это газ, в котором инверсия населенностей получена методом механического разделения. Итак, сосуд, заполнен атомами, большая часть которых находится в возбужденном состоянии. Не дожидаясь милостей от природы — в нашем случае спонтанного излучения, — запускаем туда фотон и... Да, действительно, получаем несколько актов вынужденного излучения, а следовательно, несколько фотонов, составляющих вместе с первоначально запущенным когерентный световой пучок. Но... Вот тут-то начинается целая серия «но».

Во-первых, чтобы полученный таким образом пучок фотонов вызвал сколь-либо заметный эффект, фотонов в нем должно быть очень много — миллиарды миллиардов. Что это значит? Фотоны должны пройти в активном веществе довольно большое расстояние. Подсчеты показывают, что такое расстояние измеряется десятками метров. Попробуйте заполнить активным газом трубку длиной 10 м при условии, что газ сильно разреженный (ведь в трубку попадает малая часть исходной газовой струи). Кроме того, имейте в виду, что вынужденно излучают только атомы, расположенные на пути фотонов, остальные излучают спонтанно, и каждое такое излучение кладет начало самостоятельному пучку фотонов, направленному в другую сторону и не когерентному с исходным. Каков результат? Если объем с активным веществом излучает, это излучение направлено во все стороны и не когерентно. Похоже, что усилия затрачены впустую.

Первую трудность довольно легко преодолеть. Возьмите сравнительно короткий отрезок трубки, заполненной активным веществом, и по торцам ее, строго парал-

тельно друг другу, расположите два зеркала. Если фотон-инициатор на своем пути от левого торца трубки до правого породил, скажем, сто подобных себе когерентных фотонов, то, достигнув правого торца, эти сто фотонов отражаются от зеркала и отправляются в обратный путь. На обратном пути каждый из них порождает еще сто фотонов. Десять тысяч фотонов отражаются от левого зеркала и т. д. Процесс происходит до тех пор, пока вещество остается активным, т. е. пока в нем еще имеет место инверсия населенностей.

Усиление происходит непрерывно, если в трубку постоянно подкачивать свежее активное вещество. В процессе участвуют фотоны, направление движения которых совпадает с осью трубки. Фотон, направление движения которого хоть чуть-чуть отклоняется от оси трубки, после двух-трех отражений выходит за пределы трубки и не «портит» активное вещество. Полученный в результате параллельный когерентный пучок фотонов можно вывести за пределы трубки, сделав одно из зеркал полупрозрачным.

С первой трудностью вы справились. Но как получить монохроматический пучок, т. е. пучок, все фотоны которого имеют строго одинаковую энергию, а значит, строго одинаковую частоту? Так могло бы быть, если бы у всех атомов и молекул разности между двумя соответствующими энергетическими уровнями имели строго одинаковое значение. На самом деле так не бывает. Энергетические уровни в атомах и молекулах имеют конечную ширину, или тонкую структуру. Объясняется это множеством причин. Например, электрон, состояние которого считается соответствующим данному энергетическому уровню, а спин направлен, скажем, справа налево, на самом деле обладает энергией, слегка отличающейся от энергии электрона, находящегося в точно таких же условиях, но имеющего спин, направленный слева направо. Возможны и другие эффекты.

Атомы в газе находятся в постоянном движении. Если в каком-то атоме происходит вынужденный переход, частота излученного кванта равна некоторой величине, определяемой разностью энергетических уровней, между которыми произошел переход, плюс-минус скорость движения атома. Это так называемый линейный эффект Доплера. Плюс берется, когда атом движется в ту же сторону, что и излученный фотон. В противном случае

берется знак минус. Если скорость движения атома или электронов внутри атома сравнима со скоростью света, они живут в собственном времени в соответствии с соотношениями теории относительности. Снова поправка, известная как квадратичный эффект Доплера. Если атомов в активном веществе немного, пучок фотонов получается маломощным. Однако взяв побольше атомов, вы столкнетесь с их влиянием друг на друга, а это снова послужит причиной изменения частоты отдельных фотонов.

Который час?

Попробуем оценить, насколько серьезны отклонения от монохроматичности. Знаете ли вы, что одним из первых практических применений мазеров стало использование их в качестве атомных часов? До 1957 года самыми точными часами в мире считалась наша старушка Земля, причем учитывалось ее вращение вокруг собственной оси. Развитие науки и техники потребовало часов более точных. С 1957 по 1967 год для точного измерения промежутков времени стали использовать движение Земли по орбите вокруг Солнца. Погрешность таких часов составляла 10^{-8} , т. е. относительная погрешность измерения времени равнялась одной миллионной доле процента.

В 1967 году впервые появились часы, где роль маятника играли атомы цезия-133. Точнее, использовались кванты, излучаемые при переходе электронов между двумя определенными уровнями сверхтонкой структуры основного состояния этих атомов. И здесь удалось перехитрить природу. Вместо того чтобы использовать переходы между возбужденным и основным или двумя возбужденными состояниями, решили использовать переходы внутри одного и того же состояния. Это позволило избежать ошибки, связанной с размытостью отдельных энергетических уровней.

Каков результат? Погрешность цезиевых часов определяется величиной порядка 10^{-11} , т. е. относительной погрешностью в одну миллиардную долю процента. Что же касается Земли, то из эталона времени она превратилась в объект для проверок. И не зря. Оказалось, что часы Земля не так уж точны. Они «ходят» в тысячу раз хуже цезиевого эталона.

Начиная с 1967 года секундой стали называть интер-

вал времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний в цезиевых часах. Аналогичным образом изменилось и определение единицы длины — метра. Теперь метр — это расстояние, которое проходит свет в вакууме за $1/299\,792\,458$ долю секунды.

Вы, вероятно, полагаете, что по крайней мере одну из множества задач, стоящих перед квантовой электроникой, наконец-то удалось решить до конца? Ничего подобного! 1967 год как раз и следует считать годом начала яростной борьбы за точность.

Вперед и выше

Если на расстоянии между зеркалами мазера укладывается целое число длин волн усиливаемого излучения, то возникает эффект дополнительного усиления. Из множества фотонов почти с равными частотами, а значит, и длинами волн выделяются те, длина волны которых целое число раз укладывается в промежутке между зеркалами. Что делать, если расстояние между зеркалами изменилось, например, при колебаниях температуры? Ничего, в таком случае вводится в действие система автоматического регулирования расстояния. Много и других усовершенствований позволило на сегодня достигнуть точности атомных часов порядка $5 \cdot 10^{-14}$, т. е. за 700 000 лет непрерывной работы в атомных часах накопится ошибка не более чем в 1 с. Это не предел, а очередной достигнутый рубеж.

Зачем нужна такая фантастическая точность? Нет ли здесь погони за чисто спортивными рекордами? Ничего подобного. По словам академика Н. Г. Басова, лауреата Нобелевской премии, «точные измерения длины времени и частоты важны не только для практики, но и для фундаментальной науки. Они открывают возможность проведения прецизионных экспериментов, в том числе по проверке физических теорий, предсказывающих очень слабый эффект. К подобным теориям, в частности, относится общая теория относительности. Сегодня ее следствия проверены с погрешностью около 1%, что само по себе представляет выдающееся достижение».

Пользуясь высокостабильными стандартами частоты, можно более точно определить многие мировые константы. Например, сравнить два квантовых перехода, имеющих различную природу. Это дает информацию о вели-

чине постоянной тонкой структуры, об отношении магнитного момента протона к его спиновому моменту, об отношении масс электрона и нуклона. Длительное непрерывное сравнение двух таких частот помогло бы решить вопрос, поставленный еще в 30-е годы Полем Дираком и до сих пор не нашедший ответа: постоянны ли мировые константы: заряд и масса электрона, постоянная Планка, гравитационная постоянная, или они медленно меняются с развитием Вселенной?

Вот еще один из непреложных законов развития науки: открытие в одной достаточно узкой области немедленно используется в других областях, позволяет продвинуть их, а достигнутый прогресс тут же кладется в основу новых исследований.

В поход за мощностью

Мощность фотонных пучков в газовых мазерах, используемых в качестве атомных часов, столь же мала, сколь велика точность этих часов. Это вполне объяснимо. С самого начала следует брать достаточно разреженный газ, чтобы по возможности исключить взаимное влияние одних атомов на другие. А дальше производится последовательный отбор. Сначала из общего числа атомов отбираются возбужденные. Затем из общего числа фотонов, получаемых в результате вынужденного излучения, отбираются те, частота которых близка к заданной. Получаемый в результате пучок фотонов содержит в буквальном смысле слова несколько фотонов в секунду — и вполне достаточно. Ведь задача — получить частоту колебаний с весьма высокой точностью. Дальнейшее усиление (без изменения частоты) осуществляется чисто радиотехническими методами.

К этой проблеме можно подойти и с другой стороны. Один моль любого вещества содержит примерно $6 \cdot 10^{23}$ атомов (число Авогадро), масса одного моля цезия составляет 133 г. Предположим, что в исходном потоке выделяется 1 мг паров цезия в 1 с. Этому соответствует поток, содержащий примерно $45 \cdot 10^{17}$ атомов в 1 с. Дальше в результате механического разделения выделяется одна стотысячная доля этих атомов, всего $45 \cdot 10^{12}$ возбужденных атомов в 1 с. Предположим, хотя, вообще говоря, это далеко от действительности, во всех этих

атомах совершаются вынужденные переходы с образованием соответствующих фотонов. Энергия фотона в микроволновом диапазоне, т. е. при частотах порядка 10^{10} Гц составляет примерно 10^{-4} эВ, или $1,6 \cdot 10^{-16}$ эрг. Какова максимальная мощность, которую можно получить от газового мазера? Примерно $7 \cdot 10^{-3}$ эрг/с. Что и говорить, очень мало.

Проведем другой расчет. В качестве активного вещества берем не цезий, а кремний. Причем имеется образец массой 1 г. В подобном образце содержится примерно $4 \cdot 10^{22}$ атомов. Пусть, как и в предыдущем случае, удастся выделить одну сотысячную из общего числа, т. е. $4 \cdot 10^{17}$ атомов. Предположим, что все эти атомы испытывают вынужденные переходы, причем образуются фотоны видимого света с энергией порядка 5 эВ, или $8 \cdot 10^{-12}$ эрг. В результате выделяется мощность $32 \cdot 10^5$ эрг. Поскольку в твердом теле атомы расположены очень близко друг к другу, то, как говорят, полное высвечивание всех возбужденных атомов произойдет быстро, скажем, за 10^{-6} с. В результате получается мощность порядка $32 \cdot 10^{11}$ эрг, т. е. $8 \cdot 10^4$ Дж/с, или 40 кВт. Такая мощность развивается кусочком вещества массой всего 1 г!

Все это можно было предвидеть. По самой сути рассматриваемого эффекта при каждом вынужденном переходе атома из одного энергетического состояния в другое образуется один фотон со строго определенной энергией. Полная энергия, выделяемая мазером, зависит от количества атомов, совершающих вынужденные переходы, а оно, в свою очередь, при прочих равных условиях зависит от плотности вещества. Значит, мазеры на основе твердого тела должны быть мощнее, чем газовые?

Три уровня

Но вот тут-то и возникает одно очень важное обстоятельство. Пока нам известен единственный способ создания инверсии населенностей. Общий запас энергии, накопленный веществом, складывается из запасов энергии отдельных атомов. Именно такой запас имеют в виду, когда говорят, что атом находится в данном энергетическом состоянии. Чем выше полная энергия вещества, тем больше энергии в среднем приходится на один атом. Если нагревать вещество, подвергать его воздействию

электрических разрядов, заставлять несколько веществ вступать в химические реакции или любым другим способом повышать общий запас энергии, то повышается и средняя энергия, приходящаяся на один атом. Ведь температура есть не что иное, как величина, пропорциональная средней энергии одной частицы — молекулы, атома или электрона.

Но как бы ни была велика средняя энергия, приходящаяся на одну частицу, если выделить два каких-то значения энергии, вероятность для частицы принимать состояние с более низким значением энергии, если оно вообще возможно, всегда выше, чем вероятность принимать состояние с более высоким значением. А коли так, то среди возможных уровней энергии более населенными оказываются те, которые характеризуются меньшими значениями энергии. Или, проще говоря, частиц с меньшей энергией всегда больше, чем частиц с большей энергией.

«Ленивость» природы — одно из фундаментальных ее свойств, поэтому с самого начала мы даже не мечтали как-то изменить распределение частиц по энергии. Мы сразу пошли по пути механического разделения, т. е. из общего количества атомов отбирали те, которые в данный момент характеризуются состоянием с высокой энергией. Ну а как быть, если надо построить мазер на твердом теле? Ведь твердое — оно на то и твердое, что его нельзя разделять на отдельные частицы. А закон природы на то и закон, что его нельзя нарушать.

Поступим так. Среди всех возможных для одного какого-нибудь атома уровней энергии выделим два. Уровень 1 — это уровень, соответствующий основному состоянию атома, а уровень 2 — возбужденному состоянию. Если долго наблюдать за одним атомом, то рано или поздно можно увидеть, что он переходит в возбужденное состояние. Однако в силу того же закона природы возбужденное состояние не является естественным состоянием атома и независимо от того, есть на то внешняя причина или нет, он возвращается в основное состояние, испустив при этом квант энергии.

Но произойдет это не сразу. Атом находится в возбужденном состоянии довольно долго, конечно, по атомным масштабам, в среднем от 10^{-6} до 10^{-3} с. Ему надо как бы набраться решимости, перед тем как соскочить вниз. Возбужденные состояния принято называть

метастабильными, что в переводе на разговорный язык означает «вроде как бы устойчивые». Какова бы ни была полная энергия вещества, в любой момент времени определенное число его атомов всегда находится в метастабильном состоянии. Достаточно пролететь мимо такого атома фотону подходящей частоты, происходит вынужденное излучение и вместо одного фотона оказываются два когерентных, или два близнеца.

Приблизились мы хоть на шаг к решению основной задачи создания мазера на твердом теле? С сожалением должны признаться: нет, не приблизились! Независимо от того, являются возбужденные состояния метастабильными или нет, населенность низших энергетических уровней все равно больше, чем населенность верхних, а значит, акты поглощения фотонов преобладают над актами вынужденного излучения.

Не станем, однако, отчаиваться. А если взять схему не с двумя, а с тремя уровнями? Один из уровней — основной (уровень 1), а два остальных (уровни 2 и 3) соответствуют возбужденным состояниям атома, причем уровень 3 характеризуется большей энергией по сравнению с уровнем 2. Предположим, по той или иной причине атом оказался в состоянии 3. Через какой-то промежуток времени он с большой степенью вероятности перейдет в состояние 2. С большой степенью вероятности опять же потому, что, чем меньший энергетический скачок предстоит, тем охотнее он делается.

Состояние 2 — метастабильное состояние. Задержавшись в нем на какое-то время, атом переходит в основное состояние. А теперь — внимание! На уровне 1 имеется, скажем, N атомов, а на уровне 3 — в миллиард раз меньше, т. е. $N \cdot 10^{-9}$. Подействуем на вещество мощным лучом монохроматического света. Настолько мощным, что общее количество фотонов, пролетающих за ничтожный промежуток времени, во много раз больше, чем общее количество атомов в образце вещества. Энергия каждого фотона равна разности энергий между уровнями 3 и 1. Что произойдет?

В первый момент N атомов, находящихся на уровне 1, поглощают фотоны и оказываются заброшенными на уровень 3, а $N \cdot 10^{-9}$ атомов совершают акты вынужденного излучения, добавив свои $N \cdot 10^{-9}$ фотонов к общему световому потоку, и перебираются на уровень 1. Теперь

на уровне 3 имеется N атомов, а на уровне 1 — всего $N \cdot 10^{-9}$. Неужели удача?

Нет, радоваться рано. Акты поглощения и вынужденного излучения происходят с равной вероятностью. Поэтому в следующий момент N жильцов уровня 3 совершают акты вынужденного излучения и перебираются обратно на уровень 1, а $N \cdot 10^9$, поглотив фотоны, перебираются на уровень 3. Так происходит до тех пор, пока не устанавливается равновесие (снова равновесие!) и на уровне 3 оказывается столько же атомов, что и на уровне 1. Число атомов, переходящих с уровня 1 на уровень 3 в единицу времени под воздействием светового луча, равно числу атомов, переходящих с уровня 3 на уровень 1 за то же время. Все, что удалось добиться, приложив столь героические усилия, это уравнивать населенности уровней 1 и 3. Но равенство населенностей — это еще не инверсия.

Зачем понадобилось тратить так много слов? Вот зачем. Не все жильцы уровня 3 обязательно совершают вынужденные переходы на уровень 1. Часть из них самопроизвольно (спонтанно) перескакивает на уровень 2. Находясь на уровне 2, они не испытывают никакого воздействия со стороны светового луча, каким бы мощным он ни был. Фотон переводит атом в другое состояние при условии, что его энергия равна разности энергий двух состояний, в нашем случае разности между уровнями 3 и 1. На уровне 2 атомы находятся в метастабильном состоянии и через определенные промежутки времени, которые зависят только от самих атомов, также спонтанно переходят на уровень 1.

Все зависит от того, что делают атомы более охотно, т. е. с большей вероятностью. Если они охотнее переходят с уровня 3 на уровень 2 (по сравнению с переходами с уровня 2 на уровень 1, то на уровне 2 постепенно накапливается больше атомов, чем на уровне 1. Населенности уровней 1 и 3 все время, пока действует световой луч, равны друг другу, а население уровня 2 — это атомы, ушедшие с уровня 3. Возможен случай, когда с большей вероятностью совершаются переходы с уровня 2 на уровень 1 (по сравнению с переходами с уровня 3 на уровень 2). Тогда население уровня 3 постепенно превысит население уровня 2.

Вот она, долгожданная инверсия населенностей! Пока действует световой луч, либо население уровня 2 пре-

обладает над населением уровня 1 (чаще всего так и бывает), либо население уровня 3 преобладает над населением уровня 2. Переходы с уровня 3 на уровень 2 или с уровня 2 на уровень 1 никак не зависят от того, что происходит между уровнями 3 и 1. Эти переходы совершаются спонтанно.

Но может быть и иначе. При спонтанном переходе, например, с уровня 2 на уровень 1 излучается фотон, который вызывает вынужденное излучение другого жильца уровня 2. Два когерентных фотона вынудят еще двух жильцов уровня 2 излучить фотоны и т. д. Получается цепочка: освещаем вещество, например, зеленым светом (с большой энергией фотонов) и за счет этого поддерживаем равенство населенностей уровней 1 и 3. За счет спонтанных переходов поддерживается населенность уровня 2, которая в нашем примере превышает населенности уровней 1 и 3. Образуется активное вещество, которое при определенных условиях излучает когерентный световой луч теперь уже красного цвета (с меньшей энергией фотонов). Если излучается именно свет, а не радиоволны, то такой прибор называется не мазером, а лазером, что означает опять же первые буквы английских слов «усиление света (по-английски «свет» произносится как «лайт», отсюда буква «л») за счет вынужденного излучения».

Процесс перевода атомов из состояния 1 в состояние 3 получил название накачки. Накачивать вещество можно различными способами, но пока ограничимся оптической накачкой, т. е. будем считать, что вещество освещается, а энергия фотонов, испускаемых источником света, достаточна для переброса атомов из состояния 1 в состояние 3. Значит, задача создания твердотельного лазера наконец-таки решена? Конечно, воспользоваться идеей трехуровневой схемы накачки весьма заманчиво. Но беда в том, что в твердом теле нет никаких уровней. Энергетические уровни отдельных атомов объединяются там в зоны, и зон, о которых может идти речь, либо только две, как в полупроводниковых изоляторах, либо одна общая зона, как в проводниках.

Ну что же — снова тупик? Не столько тупик, сколько трудность, и трудность преодолимая. Надо брать не чистые вещества, а вещества с примесями. Причем атомов примеси должно быть очень немного. Если выбранное вещество — кристаллическое твердое тело, атомы при-

меси располагаются в узлах кристаллической решетки, а расстояния между атомами примеси настолько велики, что отдельные характерные для этих атомов энергетические уровни не объединяются в зоны.

Можно подобрать такую пару основное вещество — примесь, чтобы три выбранных энергетических уровня примеси находились на достаточно больших расстояниях от других энергетических уровней. В частности, они могут находиться в пределах запрещенной зоны. Пример такого вещества с примесью — рубин (окись алюминия Al_2O_3 с примесью хрома). Здесь роль атомов примеси играют атомы хрома. У розового рубина содержание хрома составляет примерно 0,05%, т.е. примерно 10^{19} атомов на 1 см^3 , вполне хватает, чтобы создать четко выраженную трехуровневую схему и построить лазер огромной мощности.

Рубиновый лазер представляет собой стерженек рубина диаметром 0,5 см и длиной 4 см. Противоположные торцы стержня полируют, для того чтобы они были строго параллельны, и покрывают пленкой серебра. Вот и все. Освещают стерженек подходящим источником света, например ксеноновой лампой-вспышкой, и в ответ очень короткий, около 10^{-3} с, импульс когерентного монохроматического излучения огромной мощности. Короткий потому, что атомы в рубине расположены компактно и вынужденные переходы в них осуществляются практически одновременно огромной мощности по той же причине. Имеются способы существенно сократить длительность импульса, доведя ее до 10^{-9} с. Тогда мощность в импульсе достигнет 10^{10} Вт, что превосходит мощность самых больших электростанций мира.

Назад к газам

Располагать потоком световой энергии мощностью в десятки киловатт весьма заманчиво. В конце этой главы мы поговорим о применениях лазеров и мазеров. Но вас не смущает, что уж больно все гладко обстоит с рубиновым лазером? Не бывает так — природа ничего не дает даром. Давайте искать недостатки. Один из недостатков просто лежит на поверхности. В рубине атомы примеси расположены далеко друг от друга, но они все же взаимодействуют и друг с другом, и с атомами основного вещества гораздо сильнее, чем атомы в разре-

женном газе. Поэтому правильное говорить не об отдельных энергетических уровнях, а об очень узких, но все же энергетических зонах.

Точность, с которой поддерживается частота излучения рубинового лазера, не идет ни в какое сравнение с точностью частоты мазеров на разреженном газе с механическим разделением. Воспользовавшись терминологией оптиков, скажем, что ширина спектральной линии излучения рубинового лазера в лучшем случае составляет доли ангстрема. Это мало по сравнению, например, с шириной спектральной линии излучения красного фонаря, которым пользуются фотографы. Но все же долям ангстрема соответствуют сотни тысяч мегагерц. Часов, даже очень плохих, на рубиновом лазере не построишь.

Мы обратились к рубину в погоне не за точностью, а за мощностью. И на этом пути нас, конечно, подстерегают неприятности. Как работают трехуровневые схемы? Вещество поглощает от внешнего источника энергию, количество которой пропорционально разности между уровнями 3 и 1, а излучает количество энергии, пропорциональное разности энергий либо между уровнями 3 и 2 либо 2 и 1. То есть поглощается энергии больше, чем выделяется. Избыток поглощенной энергии преобразуется в тепло.

Речь идет о мощностях в десятки киловатт и размерах рубинового стерженька порядка 1 см^3 . Если бы рубиновый лазер излучал непрерывно, он испарился бы через доли секунды. Но и для импульсного излучения имеются свои пределы. Существует много причин, по которым часть энергии превращается в тепло. Например, неидеальное отражение от торцов рубинового стержня. Так что импульсные лазеры тоже перегреваются. Перегрев из-за потерь энергии — явление в технике очень даже привычное. Давно придуманы меры борьбы с ним — разные способы охлаждения. Рубиновый лазер, для того чтобы он не слишком перегревался, можно обдувать воздушной струей точно так же, как обдувается радиатор автомобиля.

Вот те на! Не успели мы порадоваться, создав конструкцию без всяких насосов, без газовых трубок и замкнутых объемов, как все начинается сначала: насосы, трубки, газовая струя. А что, если объединить два принципа? Сконструировать лазер на газовой струе.

Рассуждать станем так. Каким-то способом, каким — пока не знаем, нам удалось получить газ с инверсией населенностей. Выпустим струю из такого газа, и пусть эта струя проходит в промежутке между двумя зеркалами, благодаря чему и создается лазерное излучение. Газ при этом нагревается, но он тут же выходит из рабочего объема и поэтому нашей конструкции не грозит разрушение от перегрева. Отрабатывший газ выбрасывать не жалко — после вынужденного излучения атомы в нем вернулись в основные состояния, и он больше не представляет собой активное вещество.

Получается совсем неплохо. Один и тот же газ используется и для излучения, и для охлаждения. Но как сделать газ активным, создать в нем инверсию населенностей? Мы хотим построить мощный лазер, значит, плотность газа должна быть достаточно большой и методы механического разделения здесь не подходят. Атомы газа в отличие от атомов твердого тела непрерывно перемещаются в пространстве и взаимодействуют друг с другом. В процессе такого взаимодействия происходит непрерывный обмен энергиями. Поэтому в газе все уровни заселены в соответствии с законом распределения, и нельзя выделить отдельные трехуровневые системы, как в твердом теле. В известном смысле из всех состояний вещества газообразное меньше всего подходит для создания инверсии населенностей. Недаром объем с газом всегда используется как классический пример при рассуждениях о распределении по энергиям.

И все же на сегодня наибольшая мощность да еще в режиме непрерывного действия достигнута именно у газовых лазеров. Как это делается? Используется не один, а смесь двух газов, например азота и углекислого газа. С помощью накачки молекулы азота переводятся в возбужденное состояние. Накачка может быть любой, в частности оптической, но по многим соображениям удобнее всего использовать для накачки электрический разряд в газе.

Далее вводится в действие такой механизм. Молекулы азота возбуждаются и переводятся на один из самых высоких энергетических уровней. Все эти уровни близки (чуть выше) к одному из метастабильных уровней молекул углекислого газа. Молекулы азота и углекислого газа взаимодействуют между собой, в результате происходит обмен энергиями и большое количество молекул

углекислого газа оказывается на метастабильном уровне. Возникает инверсия населенностей, а дальше все уже известно.

Лазерное горючее

Рассказывая о конструкции газового лазера, мы использовали слова «отработавший газ». Здесь напрашивается тесная аналогия с сжиганием топлива. Газовая смесь, находящаяся в состоянии активного вещества, обладает определенным запасом энергии. В процессе вынужденного излучения топливо «сгорает», иначе говоря, избыток энергии преобразуется в излучение. В результате сгорания, кроме излучения, получается и отработавшее, лишенное избытка энергии вещество, так сказать, выхлоп, который и выводится за пределы рабочего объема.

Есть только одно отличие. Исходный избыток энергии несет в себе не само вещество, как, например, бензино-воздушная смесь в автомобильном двигателе. Избыток энергии создается искусственно в результате накачки. Наверное, стоит обратить внимание на одну важную подробность. Инверсия населенностей в активном газе происходит постольку, поскольку существует метастабильное состояние. Если активный газ предоставить самому себе, очень скоро, в данном случае это тысячные доли секунды и даже меньше, произойдет самопроизвольное распределение по энергетическим уровням.

При этом не обязательно в том или ином виде выделяется энергия. Вся энергия, полученная газом при накачке, может сохраниться. Просто при самопроизвольных переходах выделяются фотоны, эти фотоны тут же поглощаются другими атомами, меняя их энергетические состояния. Средняя энергия, приходящаяся на один атом, останется той же, изменяются распределения атомов по энергии, но вещество перестает быть активным. Как говорят «калиф на час», точно так же активный газ можно назвать горючим на миллисекунду.

Химические лазеры

Само слово «горючее», точнее, связанные с ним ассоциации, слишком заманчиво для того, чтобы так уж сразу отказаться от попыток продолжить намечающуюся

здесь аналогию. Что такое химическая реакция? Точнее, что происходит, когда из двух или более атомов образуется молекула? Образуется новый набор энергетических уровней и новый набор электронных конфигураций.

Для простоты рассмотрим случай, когда в экзотермической химической реакции участвуют два вещества, например два газа. До начала реакции каждый из газов находился в равновесном состоянии, что означает нормальное распределение по энергетическим уровням. Большинство атомов находится в основных состояниях, но при этом имеется и большое количество атомов, находящихся в возбужденном состоянии. Теперь представьте себе, что встречаются два атома, из которых один находится в состоянии i , а второй — в состоянии j . В каком состоянии должна находиться образовавшаяся в результате молекула? Она не может находиться в состоянии, в точности характеризуемом величиной энергии $i+j$, потому что такого состояния попросту не существует. Но с большой степенью вероятности она окажется в состоянии, наиболее близком к сумме $i+j$. Почему? Ответ все тот же: природа ленива, из всех возможных исходов она по преимуществу (заметьте, не всегда, а по преимуществу) выбирает тот, который требует наименьших затрат, в данном случае преодоления меньшей разности энергий.

Даже если указанные состояния i и j были основными состояниями атомов, из этого вовсе не следует, что состояние, которое примет молекула (как мы только что установили, ближайшее к сумме $i+j$), будет ее основным состоянием. В результате химической реакции образуется множество молекул, находящихся в самых разных энергетических состояниях. Нет ничего необычного в том, что подберется такая пара веществ, атомы которых в момент объединения породят молекулы, находящиеся в метастабильном возбужденном состоянии, иначе, породят вещество с инверсией населенностей.

Поместив смесь двух реагирующих веществ в промежуток между двумя зеркалами, вы получите лазерное излучение и отработавшее вещество, которое представляет собой не что иное, как результат химической реакции. Но теперь уже оно характеризуется тем, что большинство его молекул находится в основных состояниях.

Конструкция химического лазера похожа на реактивный двигатель самолета. Внутрь объема, который у нас

есть все основания назвать камерой сгорания, поступают дейтерий, фтор и углекислый газ (в случае самолетного двигателя это были бы, скажем, керосин и кислород воздуха). Начинается реакция, которую, так же, как и в самолетном двигателе, может оказаться необходимым инициировать с помощью электрической искры. В процессе протекания реакции на какое-то мгновение возникает инверсия населенностей и, если в нужном месте оказывается пара зеркал (а она и оказывается в нужном месте), образуется лазерное излучение. Инверсия населенностей, как говорят, высвечивается, и продукт реакции, характеризуемый теперь уже нормальным распределением молекул по энергетическим уровням, выбрасывается за пределы камеры сгорания.

Температура газа на выходе больше, чем температура смеси газов на входе (в свое время мы считали это обстоятельство одним из недостатков лазера). Газ, находящийся при большей температуре, обладает дополнительным запасом энергии, и этот запас может быть использован, например, для приведения в действие насоса, накачивающего газовую смесь в камеру сгорания.

Жидкие лазеры

Лазеры строят и на жидкостях — столь разнообразны средства для решения одной и той же задачи. Что надо для того, чтобы возник лазерный эффект? Система из нескольких, не менее трех, четко выраженных энергетических уровней. В жидкости атомы не закреплены на определенных местах, что не дает возможности воспользоваться методом малых примесей. В то же время они недостаточно интенсивно взаимодействуют друг с другом, чтобы можно было организовать непрерывный обмен энергией между атомами различных веществ. Как же поступают в этом случае? Очень просто. Если нельзя закрепить атом в кристалле, его можно закрепить в молекуле. Нужно только, чтобы молекула была достаточно сложной и большой.

Так и поступают. Для жидкостных лазеров используют специальные вещества, называемые хелатами. Хелаты характеризуются своеобразным строением молекул. В каждой молекуле атом редкоземельного элемента, например европия, окружен и тем самым отделен от остальной молекулы несколькими атомами кислорода.

Атомы кислорода осуществляют связь этого своеобразного блока, состоящего из одного атома европия и нескольких атомов кислорода, с остальной молекулой. С одной стороны, молекула велика, поэтому атомы европия достаточно далеко удалены друг от друга, чтобы вносить свой вклад в общую энергетическую структуру в виде отдельных уровней. С другой стороны, одинаковость молекул и практическая несжимаемость жидкостей приводят к тому, что молекулярная структура жидкости, а отсюда и энергетическая структура уровней оказываются вполне регулярными. Получается искомая трехуровневая система, а дальше все происходит как в обычном лазере.

Всеми цветами радуги

Еще один класс лазеров — это лазеры на органических красителях. До сих пор в качестве одного из основных свойств лазеров и мазеров мы указывали на монохроматичность получаемого излучения. Мы даже слегка погрешили против истины, сознательно утаив от читателя, что, к примеру, газовые лазеры на смеси газов могут излучать не на одной, а на нескольких частотах. Иначе говоря, могут испускать не один, а несколько разноцветных лучей одновременно. Правда, каждый луч по-прежнему остается монохроматичным.

Одно из весьма перспективных применений световых (даже не обязательно световых, а скажем, инфракрасных или ультрафиолетовых) лучей — это передача информации на большие расстояния. Заманчиво иметь передатчик, обладающий такими свойствами лазеров, как высокая концентрация энергии и высокая направленность светового луча, и наряду с этим допускающий возможность перехода с одной частоты на другую или плавной перестройки в пределах всего диапазона.

Можно ли совместить несовместимое? Монохроматичность, лежащую в самой основе работы лазеров (лазер использует вынужденное излучение, а вынужденное излучение получается в случае, когда направление импульса, частота и фаза излучаемого и вызвавшего излучение фотонов совпадают), с возможностью перестройки по частоте?

Оказывается, можно. Надо получить систему еще более сложную, чем трехуровневые системы. С этой целью смешиваем много трехуровневых систем, для чего

используем сложные молекулы, состоящие из огромного количества атомов, взаимодействующих между собой астрономическим числом способов. Если выдержаны определенные условия, о которых здесь мы не будем говорить из-за их сложности, образуется много систем, состоящих из трех энергетических уровней, и можно заставлять излучать то одну из них, то другую, помещая активное вещество между зеркалами и меняя расстояние между зеркалами, т. е. настройку резонатора. Вот и вся премудрость.

Существуют и широко используются также полупроводниковые лазеры. Ученые работают над созданием рентгеновских лазеров. Появление рентгеновского лазера открывает поистине фантастические перспективы, например, можно будет всерьез говорить о том, чтобы создать установку, позволяющую увидеть единичную молекулу или даже единичный атом.

Но существенно также и другое. Ответьте, пожалуйста, на вопрос: какое главное свойство лазера? Не будем испытывать ваше терпение. Скажем сами. Температура на поверхности Солнца имеет порядок 6 тыс. градусов, при термоядерном взрыве развивается температура 10 млн., в недрах звезд-гигантов — 100 млн. градусов. А в лучах наиболее мощных лазеров температура достигает 10 трлн. градусов (единица с 25 нулями). Вот что позволил сделать открытый советскими учеными Н. Г. Басовым и А. Н. Прохоровым и одновременно И. Таунсом эффект. Это один из редчайших случаев, когда человеку, его науке и технике удалось во столько раз превзойти природу.

Наверное, таков и должен быть ответ на вопрос о главном свойстве лазера. На сегодня это возможность создания сверхвысоких плотностей энергии. Одна из областей применения лазеров — запуск термоядерных реакций. Мы уже говорили, что для этого нужна температура не менее 10 млн. градусов. При подобных температурах для лазерного луча не существует препятствий. Поэтому открываются широчайшие возможности использования лазеров для обработки всевозможных материалов.

С помощью лазера ничего не стоит просверлить отверстие в алмазе. Благодаря свойству лазерного луча не расходиться, такое отверстие получается очень тонким, несколько микрометров. Лазерный луч без всякого труда разрезает толстую чугунную или бетонную плиту. Нет

вещества, естественного или искусственного, способного противостоять лазеру. Лазерные установки позволяют производить обработку (не только сверление и резание, но также пайку и сварку) с поистине оптической точностью. Рентгеновские лазеры излучают фотоны с очень высокими энергиями. Поэтому оказывается возможным, например, передать по лазерному лучу энергию термоядерного взрыва.

И наконец, солнечный зайчик, с которого мы начали эту главу: лазерные лучи используют для передачи информации (телефонных разговоров, радио- и телевизионных передач) на любые расстояния, в том числе на Луну. А если на пути встречается препятствие, его можно обойти. Для этого лазерный луч пропускают внутри тонкого стеклянного волокна — световода.

Перечислили ли мы хотя бы основные области применения лазеров? Нет, мы даже не делали такой попытки, мы лишь дали некоторое представление о том, к чему могут привести исследования, первоначально имевшие весьма скромную цель — сделать точные атомные часы.

Пятое состояние

Принято считать, что научно-технический прогресс идет по пути увеличения сложности. Вряд ли кто-нибудь станет возражать против того, что современный радиоприемник сложнее колокола или барабана, с помощью которого передавали информацию наши далекие предки, а шагающий экскаватор сложнее лопаты. А что сложнее, лазер или костер, послуживший, по всей вероятности, первым источником лучистой энергии, созданным человеком? В костре так же, как и в лазере, при переходах атомов из одних энергетических состояний в другие излучаются фотоны. Только в костре эти переходы спонтанные, иначе говоря, самопроизвольные, хаотичные. Более того, излучению фотона атомом топлива, сгорающего в костре, предшествует длинная цепь физических и химических преобразований. С этой точки зрения костер гораздо сложнее лазера.

Топливом, сгорающим в лазере, может в принципе служить любое вещество, в котором создана инверсия населенностей (так называемое активное вещество). До самого последнего времени в физике было принято раз-

личать сначала три, а потом четыре основных агрегатных состояния вещества. Первые три известны каждому: твердое, жидкое, газообразное. В начале нашего века стало известно четвертое состояние — плазма.

Сейчас есть все основания ввести понятие пятого состояния — состояния с инверсией населенностей. Если удастся перевести вещество в пятое состояние, получим самый универсальный и самый простой или, если угодно, самый естественный источник энергии. Простота здесь важна не только ради простоты. У некоторых типов лазеров коэффициент полезного действия приближается к 100%.

Почему такое огромное расстояние во времени отделяет костер от лазера? Причина простая. Пятое состояние вещества — состояние с инверсией населенностей — не свойственно природе. Оно противоречит извечному и всеобъемлющему стремлению природы к лени, наименьшему действию, стремлению любой системы принять состояние, в котором она обладает наименьшей собственной энергией. Вывести систему из этого состояния можно только повышением уровня организации материи. Пятое состояние вещества — это состояние с высокой организацией. Поэтому, не боясь показаться претенциозными, мы можем назвать пятое состояние вещества умным состоянием, а энергию лазерного луча — энергией повышенного качества, и на этом закончить книгу, посвященную различным видам энергии.

Заключение

Так грозит ли Вселенной тепловая смерть? На страницах этой книги мы пытались показать, что запасов энергии во Вселенной предостаточно и, более того, в силу закона сохранения даже самая малая ее часть не может никуда исчезнуть. Происходят процессы преобразования энергии более высокого качества в энергию более низкого качества. Собственно, то, что понималось под тепловой смертью, и было опасение, что постепенно вся энергия Вселенной превратится в энергию самого низкого качества, т. е. тепловую. Однако оснований для таких опасений нет. Мы повсеместно наблюдаем как процессы ухудшения, так и процессы улучшения качества энергии.

Если верить в теорию большого взрыва, а сейчас все большее и большее число ученых становятся приверженцами этой теории, то вообще оказывается, что, начиная с «момента нуль», когда вся Вселенная состояла из одних излучений, качество энергии имеет тенденцию к повышению. Так что не будем бояться тепловой смерти Вселенной, да и вообще, наверное, имеет смысл прекратить о ней разговоры, вычеркнуть эту проблему как неудачно сформулированную.

Рассуждая о качестве энергии, мы пришли к выводу, гораздо более важному, чем разговор о тепловой смерти. Оказывается, окружающая нас материя, кроме многих своих свойств, известных из курса физики, обладает еще одним весьма интересным свойством — свойством организации. Как раз это свойство определяет очень многое, в том числе и качество энергии. К сожалению, в пределах этой книги мы лишены возможности даже очень поверхностно коснуться организации материи. Для этого потребовалась бы целая книга, и может быть, не одна. Намекаем лишь, что степень организованности материи измеряют сейчас величиной, которая может иметь чис-

ленные значения, и называется эта величина информацией. Поняв роль информации в общем ряде процессов, происходящих вокруг нас, мы еще во много раз увеличиваем свою власть над миром. Как связана информация с качеством энергии, проницательный читатель мог понять из этой книги.

Наконец, последнее. Все время, пока мы писали эту книгу, мы старались и в явной, а подчас и в неявной форме провести одну мысль: мир, каким его описывает современная физика, чудовищно, невообразимо не таков, каким он представляется нашим органам чувств. Поэтому, для того чтобы понять хотя бы отдельные детали мира, недостаточно начитать учебников, как бы добросовестно этим ни заниматься. Нужно суметь воспитать в себе новое видение, хотя, честно говоря, мы совершенно не представляем себе, как это можно сделать. Но сделать это надо. Иначе мы будем все время находиться в положении человека, считающего, что Земля представляет собой плоский блин, а небесные светила движутся, будучи прикрепленными к хрустальным сферам.

Прощаясь на этом с читателями, мы приведем два высказывания одного из самых проницательных людей нашего века академика Л. Д. Ландау.

«Сейчас человек может работать со знанием там, где его воображение бессильно», — писал Ландау.

«Если не залезать в слишком далекое прошлое, — подчеркивал он, — то основными колоссами, на которых держится современная физика, являются теория относительности, созданная в 1930 году, и квантовая механика, созданная в 1900—1927 годах. Эти теории являются самыми общими из известных нам законов природы, и дальнейшее развитие теоретической физики возможно лишь на пути дальнейшего их усовершенствования. Кроме того, эти теории научили нас тому, что нельзя подходить к изучению природы с предвзятой меркой представлений, заимствованных нами из нашего скромного жизненного опыта, что природа устроена бесконечно хитрее, чем люди когда-либо могли вообразить себе».

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие

3

Глава 1

Теплота

5

Глава 2

Движение

31

Глава 3

Электричество

64

Глава 4

Химическая энергия

102

Глава 5

Атомы и атомная энергия

135

Глава 6

Энергия высшего качества

160

Заключение

189

Научно-популярное издание

Алексей Вольдемарович Шилейко
Тамара Ивановна Шилейко
В ОКЕАНЕ ЭНЕРГИИ

Главный отраслевой редактор *В. П. Демьянов*
Редактор *С. Н. Попова*
Худож. редактор *М. А. Бабицева*
Художник *А. Е. Григорьев*
Техн. редактор *О. А. Найденова*
Корректор *С. П. Ткаченко*

ИБ № 10005

Сдано в набор 30.05.88. Подписано к печати 24.10.88. А 02845. Формат бумаги 84×108 1/32. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,08. Усл. кр.-отт. 10,40. Уч.-изд. л. 10,35. Тираж 100 000 экз. Заказ 8—230. Цена 50 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4: Индекс заказа 897707.

Полиграфкомбинат ЦК ЛКСМ Украины «Молодь» ордена Трудового Красного Знамени издательско-полиграфического объединения ЦК ВЛКСМ «Молодая гвардия». 252119, Киев, ул. Пархоменко, 38—44.