

А.Б.Мигдал

\*ученые\*  
ДЭ  
школьники\*

# Как рождаются физические теории





**АРКАДИЙ БЕНЕДИКТОВИЧ МИГДАЛ** — советский физик-теоретик, академик АН СССР. Родился в 1911 г., окончил Ленинградский университет в 1936 г. В 1943 — 1945 гг. работал в Институте физических проблем АН СССР, в 1945—1971 гг. — в Институте атомной энергии, с 1971 г. — в Институте теоретической физики АН СССР.

В области ядерной физики А. Б. Мигдал положил начало новым научным направлениям, внес огромный вклад в развитие

квантовой теории, теории ядра, физики элементарных частиц и других разделов физики.

Профессор Московского инженерно-физического института А. Б. Мигдал создал большую научную школу, из которой вышли академики, члены-корреспонденты, доктора и кандидаты наук.

А. Б. Мигдал награжден орденом Ленина, тремя орденами Трудового Красного Знамени и орденом Октябрьской революции.

А. Б. Мигдал

Библиотечка  
Детской  
энциклопедии



# Как рождаются физические теории

Редакционная  
коллегия:  
*И. В. Петрянов*  
(главный редактор),  
*И. Л. Кнуляц,*  
*А. Л. Нарочницкий*



Москва,  
«Педагогика»  
1984

ББК22.3  
М57

Рецензенты:

член-корреспондент АН СССР

*И. М. Халатников*

кандидат физико-математических наук

*Л. В. Тарасов*

Литературная запись *Е. В. Петесовой*

**Мигдал А. Б.**

**М57** Как рождаются физические теории. — М.: Педагогика, 1984. — 128 с., ил. — (Б-чка Детской энциклопедии «Ученые — школьнику»).

**40 коп.**

Известный советский ученый академик А. Б. Мигдал рассказывает в своей книге об особенностях теоретической и экспериментальной работы ученых-физиков, о том, какими качествами должны обладать люди, избравшие физику своей профессией.

М  $\frac{4306000000-074}{0005(01)-84}$  54—84

**ББК22.3**  
**53**

## Вступление

Вот перед глыбой камня стоит человек и смотрит на нее с удивлением и любопытством. Вдруг он видит каким-то внутренним взором — интуицией,— что в глубине камня скрыта необычайная форма, величественная фигура, нужно только освободить ее, выпустить на волю. И человек берет в руки молоток и резец; он рубит камень, обтачивает, полирует его — он овладевает мастерством. Но и секретов ремесла человеку мало: он даст камню название «мрамор» — «сияющий камень», — он должен постичь его природу, узнать каждый кристалл, чтобы подчинить глыбу своей воле. Чтобы из белого мрамора возникло чудесное создание, красивое и мудрое, чтобы люди замирали в восторге, глядя на него, мастерство и вдохновение должны слиться в творчество.

Вот стоит человек перед огромным миром. Он слышит плеск волн, шум ветра, видит сияющее Солнце, далекие звезды, чувствует движение Земли, и интуиция подсказывает ему, что все должно быть связано в природе, что красота окружающего имеет высокий и таинственный смысл... Разгадать загадки Вселенной, познать непознанное призвано научное творчество.

Наука о природе — физика, открывающая суть и основы материального мира, ведет нас строгим и нелегким путем к истине. Любопытство и удивление



толкают человека на этот путь, заставляют его учиться всю долгую вечную дорогу. За это природа дарит ему великое благо — знание, и оно служит человеку, облегчая его труд на Земле, открывая путь в космос.

Развитие науки имеет свои законы. Из наблюдения окружающего рождается предположение о природе и связях процессов и явлений; из фактов и правдоподобных предположений строится теория; теория проверяется экспериментом и, подтвердившись, продолжает развиваться, снова проверяется бесчисленное множество раз... Такой ход развития и составляет научный метод; он позволяет отличить заблуждение от научной истины, проверить предположение, избежать ошибок.

Мы оставим в стороне экспериментальную физику, которая требует отдельного разговора, только иногда будем напоминать: эксперимент — верховный судья

истины. Вы узнаете о том, как создаются, проверяются и развиваются физические теории, о том, что остается за пределами ваших школьных учебников, что не успевают рассказать вам ваши учителя.

У физики своя форма приложения общего научного метода, свои принципы познания. Они позволяют увидеть стройный мир симметрий, начинающийся с простейшей геометрической правильности и простирающийся до свойств элементарных частиц. Принципы симметрии лежат в основе самых сложных, самых современных физических теорий, более того — в основе законов природы. Главное направление современной физики — поиски симметрии и единства законов природы.

Мы с вами постараемся понять суть тех удивительных событий, которые произошли в физике XX в., когда была создана квантовая теория, позволившая открыть законы, управляющие микрообъектами; теория относительности, давшая новое представление о пространстве и времени... Когда эти теории объединились, они привели к открытию целого мира элементарных частиц, к разгадке тайн далеких звезд, к познанию истории Вселенной.

Хотелось бы, чтобы книга помогла вам узнать физику настолько, чтобы решить, хотите ли вы посвятить ей свою жизнь.

Итак, пусть любопытство заставит вас сделать усилие, необходимое для понимания, и «вперед, без страха и сомненья»!

## Наблюдение — теория — эксперимент...

Великий немецкий поэт, философ, естествоиспытатель Иоганн Вольфганг Гёте сказал: «Всякое созерцание переходит в наблюдение, всякое наблюдение — в соображение, всякое соображение в установление важной связи, и можно сказать, что всякий раз, когда мы внимательно вглядываемся в мир, мы создаем теорию». Но теоретические построения оставались бы просто забавой мудрецов, если бы не существовало надежного испытания — эксперимента. Только подтвердившись экспериментом, теория обретает истинную жизнь, дарит людям новое открытие, предсказывает открытия будущие...

Наблюдение — теория — эксперимент — и снова все сначала — такова бесконечная, уходящая ввысь спираль, по которой движутся люди в поисках истины. Так решает свои задачи физика.

Профессия начинается с понимания круга проблем своей науки, с овладения навыками, секретами ремесла.

**Путь познания.** Старые легенды рассказывают, как люди и даже боги не могут сойтись в мнениях об увиденном. В смешной английской песенке про трех смелых звероловов поется: «Смотрите, это месяц, — зевнув, сказал один. Другой сказал: — Тарелка! — А третий крикнул: — Блин!»

Песенки и сказки рассказывают не просто о курьезном недоразумении — вопрос о том, как может и может ли вообще человек, полагаясь лишь на свои ощущения, составить представление об окружающем, был одним из главных вопросов философии с древнейших времен. Доведенные до отчаяния мудрецы, наконец, стали отказываться от попыток узнать





что-либо, заявляя, что ничего нельзя утверждать, даже того, что снег белый, а я говорю, что он черный, и никто не сможет это опровергнуть; ничего нельзя понять, «нет ничего истинного, что не могло бы оказаться ложным». Унылая философия скептиков оказалась настолько живучей, что даже в XVII в. ее пришлось осмеивать великому французскому драматургу Мольеру. В его комедии «Брак поневоле» философ Марфуриус говорит: «Наша философия учит не высказывать ни о чем решительных суждений, обо всем говорить неуверенно, все оставлять под сомнением, под вопросом — вот почему вы должны сказать не «я пришел», а «мне кажется, будто я пришел». Здравомыслящий Сганарель удивлен: «Выходит, что меня здесь нет и вы со мной не говорите?» «Мне представляется, что вы здесь, — отвечает Марфуриус, — и мне кажется, что я с вами говорю, но это не непреложно».

Но, как ни смейся над скептиками, проблема познаваемости мира и достоверности знания грозно стояла на пути зарождающихся опытных наук. Она была очень остра и актуальна на заре Нового времени, когда жили и работали Коперник, Галилей, Кеплер.

Лишь в начале XVII в. зародился научный метод познания реальности, и на нем как на прочном фундаменте основываются с тех пор опытные науки.

Из чего же складывается этот метод?

**Достоверное и невозможное.** Научный подход начинается с проведения границ достоверного и невозможного. Сделать это позволяет стабильность достижений науки. Что это значит?

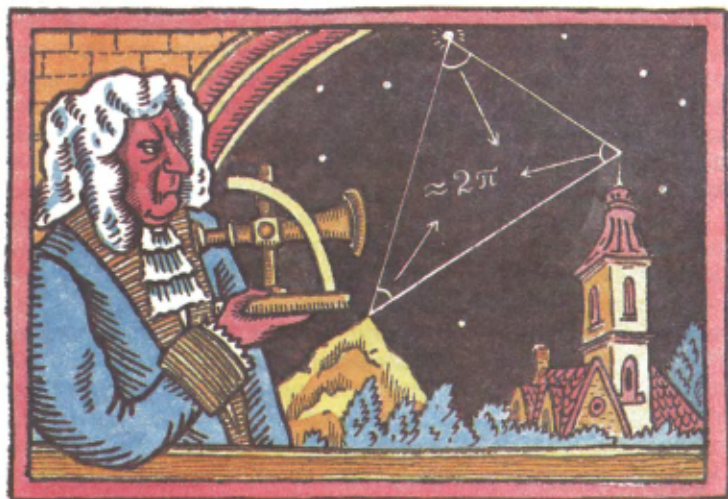
Хорошо проверенные законы и соотношения остаются неизменными и после нового значительного открытия или научной революции. Радиоастрономия совершила переворот в астрофизике, позволив обнару-

жить радиогалактики, пульсары, реликтовое излучение, но фундаментальные закономерности физики не изменились. Даже теория относительности Эйнштейна, перевернувшая привычные представления о пространстве и времени, практически не изменила хорошо известных законов механики и электродинамики тел, движущихся с обычными скоростями.

Новая теория тяготения, созданная Эйнштейном, предсказала, что гравитационное поле вблизи тяжелых тел изменяет геометрические свойства пространства,— к этому поразительному предсказанию мы не раз еще вернемся. Согласно теории тяготения, около Солнца геометрия отклоняется от обычной, евклидовой, которую мы учим в школе; сумма углов треугольника хоть и мало, но отличается от  $180^\circ$ , отношение длины окружности к радиусу — от  $2\pi$ , линия кратчайшего расстояния между двумя точками отличается от прямой, проходящей через них,— и это было хорошо проверено на опыте,— лучи далеких звезд, проходя мимо Солнца, искривляются.

Значит, более двух тысяч лет люди распахивали землю, строили, чертили карты, пользуясь неправильной геометрией? И нужно сейчас же исправить школьные учебники?

В науке существует «принцип соответствия», согласно которому новая теория должна переходить в старую в тех условиях, для которых эта старая была установлена. Измерения, наблюдения, опыты с глубокой древности до наших дней показывают, что геометрические теоремы, примененные к реальным физическим объектам, выполняются с огромной точностью. Великий немецкий ученый, заслуживший прозвище «короля математики», Карл Гаусс проверил, не отклоняется ли геометрия нашего мира для больших размеров от евклидовой, определяя свойства треугольника, образованного вершинами трех гор.



В пределах точности его опытов евклидова геометрия подтвердилась. Но можно указать такой масштаб расстояний, на котором не останется ничего похожего на обычную геометрию, — он будет колоссально велик, масштаба радиуса Вселенной. Сильно изменится геометрия и вблизи сверхплотных звезд. Но для физических тел, окружающих нас, она сохраняется очень точно.

Итак, научная революция, даже коренная, не отменяет ранее установленных законов и соотношений, а лишь уточняет их, помогает определить область их применимости.

Зная, что хорошо проверенные законы неизменны, можно отличить явления, не вызывающие сомнения, от того, что противоречит многолетнему научному опыту. Посередине окажется область неизученного, но возможного — здесь и сосредоточены интересы науки.

В области достоверного окажется все, что не может быть опровергнуто при любом повороте в развитии науки. Что может пошатнуть представление о том, что Земля круглая? Что заставит поверить в существование вечного двигателя, т. е. в грубое нарушение закона сохранения энергии? Анализ достоверных фактов заставляет физиков скептически относиться к телекинезу — способности передвигать предметы по желанию человека, силой духа. За несколько столетий сколько несчастных, одержимых мечтой о неожиданном богатстве, стояло у игорных столов, не сводя глаз с маленького шарика рулетки. Но хотя игроки ставят на кон свою собственную жизнь, тщательный анализ выигрышей показал, что они всегда подчиняются теории вероятности.

Ни в одном добросовестном физическом эксперименте желание экспериментатора не влияло на результат измерений, хотя физикам приходится иметь дело с необычайно легкими и легко перемещаемыми объектами.

Наука оберегает свои завоевания, она лишь переосмысливает старое, не отвергая, а вбирая его в себя, как вписываются старые дворцы и храмы в новый прекрасный город.

**Догадка и истина.** Следующий шаг — безжалостно отделить самую красивую, самую романтическую и даже правдоподобную догадку от доказанного утверждения. Это необходимо опытным наукам так же, как криминалистике; науке — чтобы не потонуть в море суеверий, криминалистике — чтобы не стать опорой беззакония.

Для возникновения жизни на планете необходимо совпадение множества сложнейших условий, и каждое условие делает это событие все менее вероятным, так что жизнь во Вселенной — крайне редкое явление. Если бы условия совпали, если бы жизнь на других планетах все-таки зародилась, если бы ее



развитие привело к высокоразвитой цивилизации, если бы странная прихоть или случайность забросила пришельцев в дальний уголок, в нашу Солнечную систему, они могли бы посетить Землю, если бы их организм был приспособлен к земной природе, если бы... Но утверждать, что они действительно здесь побывали, нет никаких оснований, все «следы инопланетян», обнаруженные любителями романтики, вернее — псевдоромантики, имеют простое и естественное объяснение. Любители с необычайной легкостью находят их повсюду, не задаваясь сложными вопросами, не снисходя до объяснений и доказательств.

Еще в Древнем Риме юристы при решении дел исходили из презумпции невиновности: обвиняемый считался невиновным до тех пор, пока его вина не доказана. Когда речь идет о странных и необычных явлениях, ученые не обязаны доказывать, что их

нет, но романтики обязаны доказать, что такие явления существуют.

Правило «во всем сомневаться», доведенное когда-то скептиками до абсурда, ученые взяли на вооружение, пользуясь им в разумных пределах.

Конечно, не следует, отнеся что-либо к разряду необычного, навсегда отступить от него — серьезный экспериментатор, беспристрастно и всесторонне изучая явления, может обнаружить много интересного. Не нужно только задаваться целью доказать или опровергнуть явление — это ведет к предвзятости, — а лишь тщательно изучить его.

**Научный метод и профессионализм.** Предельный профессионализм — одно из главных требований к человеку, посвятившему себя науке. Можно назвать его здравым смыслом научной работы. Наука не может двигаться без внезапных скачков мысли, озарений, интуиции, но неожиданные идеи, выдерживающие проверку, возникают только на основе профессионализма. Да и научная интуиция рождается в результате серьезной работы, как в хирургии, где сложные вещи удаются только на самом высоком профессиональном уровне.

«Как же так, — скажете вы. — Ведь всем известно, что Ампер и Фарадей не получили специального образования, Вольт учился в школе иезуитского ордена, Джоуль был пивоваром, врачами были Коперник, Гельмгольц и Майер, юристами — Авогадро, Лавуазье и Ферма. Писателей, получивших профессиональную подготовку, можно пересчитать по пальцам, а Толстой был артиллеристом, Достоевский — топографом, Чехов — врачом...»

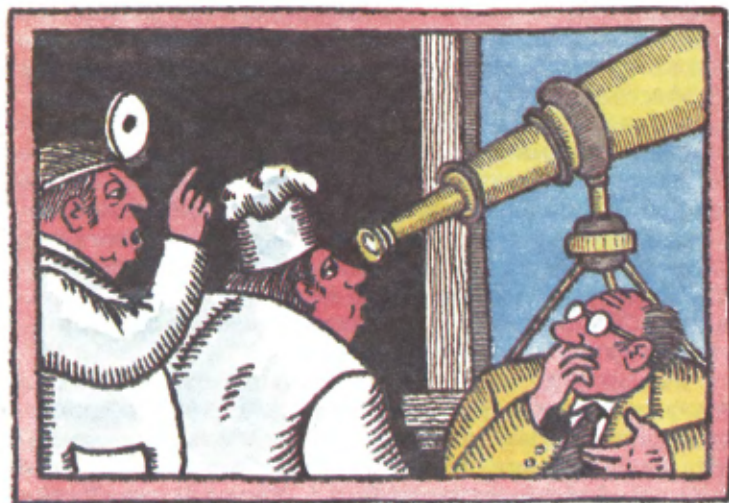
Это сильно осложняет вопрос о дилетантах и профессионалах. Но если немного подумать, становится очевидным, что все перечисленные «дилетанты» достигали успеха, только став образованнейшими в новой области специалистами. Юрист Эдвин Хаббл

сделал крупнейшие открытия в астрономии только после того, как проработал много лет простым наблюдателем в обсерватории, полностью овладел новой специальностью...

Недоверие ученых к любителям часто принимают за некрасивое стремление к элитарности, замкнутости научных кругов, пропуском в которые будто бы может служить только свидетельство о специальном образовании. Нет, справку иметь не обязательно, но обязательно в совершенстве владеть методом, знать тайны мастерства.

Один из главных пороков дилетантов в любой области человеческой деятельности — верхоглядство. Обратимся к далекой от нашего рассказа науке — археологии.

Говорят, что еще маленьким мальчиком, слушая легенды, которые рассказывал отец, Генрих Шлиман сказал: «Когда я вырасту, я найду Трои. .» Он вырос,





изучил множество языков, стал торговцем, королевским купцом, основал банк и тогда все бросил, поехал искать Трою, легендарный город, описанный Гомером в «Илиаде». Он открыл новый мир, уникальные памятники, сделал историю богаче на тысячу лет. Но Шлиман не был профессионалом! Он торопился, уничтожил верхние слои, древние сооружения, стены; его датировки оказались неверными, он принял за слой, соответствующий гомеровской Трое, более древний... Заслуга Шлимана перед историей так велика, что ученые прощают ему ошибки, но с оговорками. Автор интересной книги по археологии Карел Корам пишет о Шлимане: «... в первый год он вел себя на холме Гиссарлык как мальчик, который, стремясь узнать, как устроена игрушка, разбивает ее молотком...»

Пример настоящего научного подхода показал другой человек, сделавший самую выдающуюся находку в Египте, открывший гробницу фараона Тутанхамона. Его имя — Говард Картер, великий археолог, сумевший сочетать максимальную научную точность и добросовестность с энтузиазмом исследователя. Когда после шести лет поисков был найден вход в гробницу, Картер записал в своем дневнике: «За этим ходом могло скрываться буквально все, что угодно, и мне пришлось призвать на помощь все мое самообладание, чтобы не поддаться искушению сейчас же взломать дверь и продолжать поиски». Работа археолога требует осторожности — ведь неловкое движение, струйка воздуха может уничтожить то, что потом уже никогда не восстановишь. Картер движется очень медленно, шаг за шагом, открывая невиданные сокровища, свидетельства духовной культуры Древнего Египта, и археолог полностью сознает важность научной задачи, стоящей перед ним. Нужно было установить первоначальное расположение предметов, законсервировать,

обработать, упаковать найденное, сообщить о находках другим специалистам, создать исследовательскую лабораторию... Не вскрывая следующей комнаты, Картер прекратил работы и решил засыпать только что раскопанную гробницу. Он вернулся только через год. Благодаря мужеству и выдержке ученого, в совершенстве владеющего своей профессией, и научная ценность этих раскопок оказалась значительнее всех прежних.

Часто можно услышать, что специалист ограничен своими знаниями, не может увидеть неожиданного. Конечно, есть плохие специалисты, но те, кто стоит на переднем крае науки, не могут допустить предвзятости. Можно привести множество примеров отказа ученых от привычных представлений, но при обязательном условии, чтобы новые взгляды не противоречили хорошо установленным фактам. Дилетантам, утверждающим «со стороны виднее», не надо считаться с фактами, потому что они их не знают.

**Ступени познания.** Во всех опытных науках — физике, химии, астрономии, биологии, психологии... для того чтобы установить истину, нужно поставить научный эксперимент, дающий повторяющиеся результаты и подтвержденный независимыми опытами других исследователей. Без требования повторяемости и воспроизводимости результатов эксперимента нет науки.

Астрономический эксперимент состоит в том, что определенным образом отбирается место, время и способ наблюдения. Даже математики делают правдоподобные предположения, т. е. эксперименты, которые превращаются в строгие доказательства. В биологии, психологии часто требуется не количественный, а качественный эксперимент, но и здесь он позволяет установить общность соотношений, из которой выводятся закономерности, — на этом основывается наука.

Научный эксперимент — верховный судья истины — устанавливает факты. Науку составляют факты, соотношения между ними и, главное, систематизация этих соотношений с помощью сознательно упрощенной модели явления. Такая систематизация фактов и называется теорией.

Эксперимент испытывает предсказания теории на прочность. Когда теория, наконец, не выдержит, строится новая, с учетом старых фактов и тех, что появились при проверке. Если убедительно построенная теория противоречит установленным фактам, возникает научный парадокс, происходит скачок в развитии науки.

Только после превращения собрания фактов в стройную систему представлений — в теорию — возможно предсказание новых явлений.

Итак, каков же путь научного познания?

Эксперимент, теория, правдоподобные предположения, гипотезы — новый эксперимент, уточнение, проверка границ применимости теории, возникновение парадоксов, новая теория, интуиция, озарение — скачок — новая теория, новые гипотезы — и снова эксперимент...

В основе научного метода лежит объективность, воспроизводимость, непредвзятость; он развивался, совершенствовался и был отобран как самый рациональный — уже более трех веков руководствуется им на своем пути наука.

Великий Эйнштейн говорил, что научный метод дает средства для достижения цели, но сам по себе не есть цель — сам по себе научный метод никуда нас не приводит; он и не появился бы без страстного стремления к истине.

**Научное творчество.** Что нужно альпинисту, идущему на штурм Эвереста? Хорошее снаряжение, владение техникой восхождения, нужно уметь пе-

реносить холод, ночевки на снегу, уметь дышать, смотреть и не слепнуть, тащить на спине огромный рюкзак. Но нужно еще и уметь соразмерить силы, выбрать направление, знать, что делать, если товарищ сорвался в трещину...

У ученого свои вершины, и, поднимаясь к ним, он должен не только владеть техникой исследования, но и воспитать себя для подвижнической работы.

**Побуждения к творчеству.** Почему человек берется решать научные задачи? Конечно, потому, что он хочет принести пользу людям. Но иногда еще ему нужно доказать кому-то, а то и всему свету, что именно он может это сделать,— назовем это стремлением к самоутверждению. Иногда он чувствует потребность и способность решить нерешенную задачу — назовем это желанием самовыражения. Это уже ближе духу науки, но самое благородное, отвечающее цели побуждение — любопытство, желание узнать, как устроена природа.

Английский поэт, автор всем вам известной книги про Маугли, Киплинг писал:

*Есть у меня шестерка слуг, проворных, удалых.*

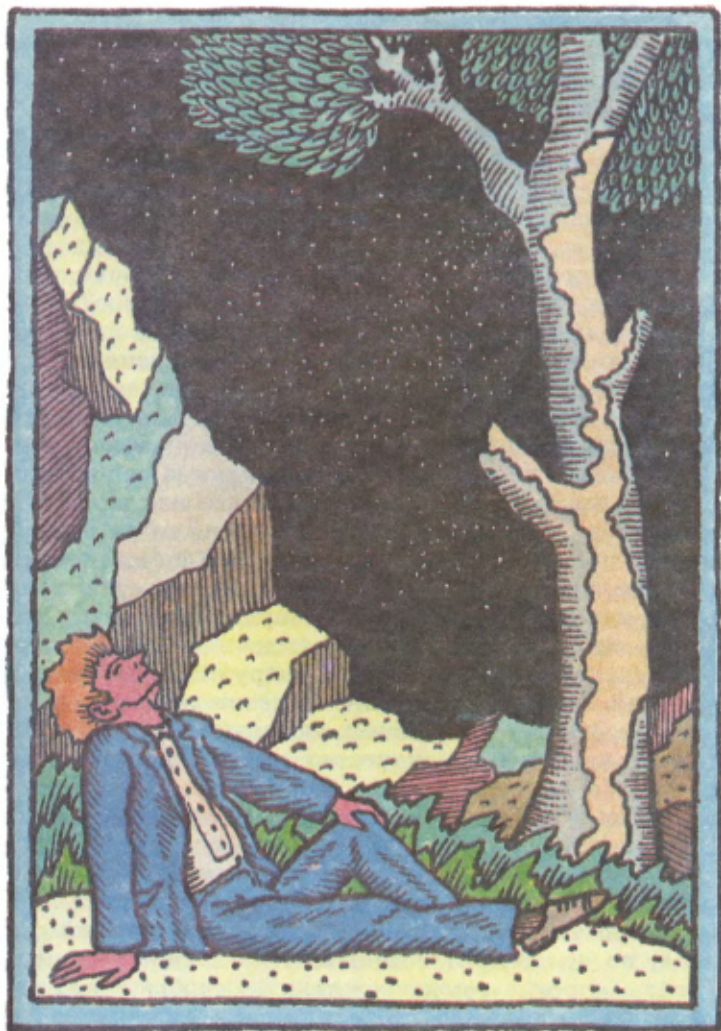
*И все, что вижу я вокруг,— все знаю я от них.*

*Они по знаку моему являются в нужде.*

*Зовут их: Как и Почему, Кто, Что, Когда и Где.*

Цель научной работы — узнать, как, почему, когда, где, что происходит на самом деле, что произошло такого, чего не было известно раньше...

В статье «Пролог» Эйнштейн говорит, что одни посвящают себя науке, чтобы проявить свое дарование, другие — из-за приличного вознаграждения, «... но ясно, что если бы люди, посвятившие себя науке, относились только к этим двум категориям, то ее здание никогда бы не выросло до тех величественных размеров, которые оно имеет в настоящее время, точно так же, как не смог бы подняться лес, состоящий из одних лишь ползучих растений».



Ученый не должен стремиться сделать открытие. Разъясним это, может быть, неожиданное заявление. Конечно, можно мечтать об открытии, но эта мечта должна контролироваться безупречной добросовестностью и в процессе исследования спрятаться подальше. Если она пересилит — почти неизбежно начинается погоня за эффектными результатами, невольная подтасовка фактов — и человек погиб для науки!

Очень важно уметь посмотреть другими глазами на привычное и удивиться ему; например, ночью поднять глаза и задуматься: почему небо темное? Ведь если Вселенная бесконечна и звезды заполняют ее более или менее равномерно, небо должно сиять ярче тысячи солнц — число звезд с расстоянием растет быстрее, чем падает интенсивность света от каждой отдельной звезды... Этот парадокс разъяснился, когда ученые узнали, что Вселенная когда-то — двадцать миллиардов лет назад — состояла из сверхплотной материи, когда не существовало не только звезд, но и ни молекул, ни атомов, ни ядер... К нам приходит свет только тех звезд, которые находятся на расстоянии меньше двадцати миллиардов световых лет. Новое понимание Вселенной подобно скачку, который сделало человечество, обнаружив, что Земля круглая. Способность увидеть неожиданное в привычном, умение удивляться, любопытство исследователя — неперенное качество человека, посвятившего себя науке.

**Рифы и отмели.** Говорят, что на ошибках учатся. Специалист, по словам замечательного датского физика Нильса Бора, — это тот, кто знает распространенные ошибки и умеет их избегать.

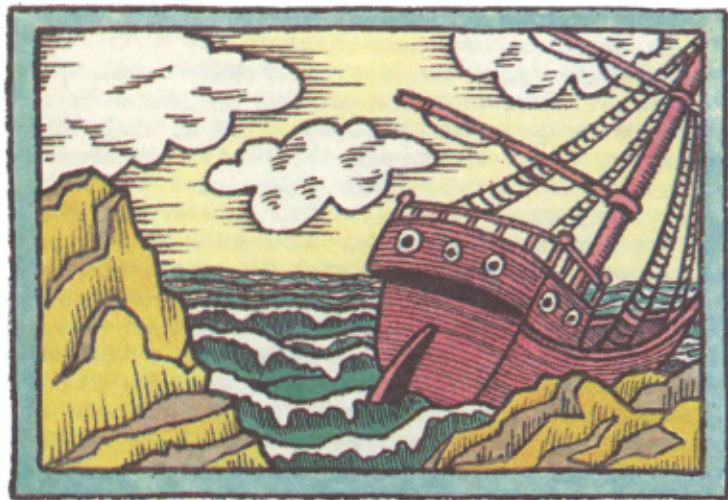
Начиная работу, ученый невольно ищет доводы «за», но он должен помнить, что главное — искать доводы «против», подтверждающие соображения возникают сами, помимо сознания. Ничтожная ошибка вначале может привести к катастрофе, и успокаиваю-

щие аргументы защищают эту роковую ошибку от пристального критического взгляда.

В лаборатории, которую возглавлял опытный экспериментатор, изучали, как распределяются по энергиям альфа-частицы, вылетающие из ядер, или, иными словами, энергетический спектр альфа-частиц. Этот спектр состоит из резких максимумов, а разница между энергиями максимумов показывает возможные значения энергии того «дочернего» ядра, которое возникло после альфа-распада. И когда экспериментаторы нашли равноотстоящие по энергии группы альфа-частиц, это означало, что интервалы между энергетическими уровнями дочернего ядра одинаковы! Этот результат был полной неожиданностью и противоречил существующим представлениям о структуре ядра. Теоретики не смогли объяснить его, и началась дальнейшая проверка.

Что же оказалось? В самом начале равноотстоящие значения энергии получились случайно, и экспериментаторов так взволновала возможность сделать открытие, что каждый раз, когда выходило по-другому, они проверяли напряжение в сети. Если напряжение отличалось от нормы, результат измерений отбрасывался. Беда была в том, что проверку делали только тогда, когда получался нежелательный результат. Небольшая предвзятость в обработке фактов из-за большой статистики привела к неправильному выводу. Добросовестный экспериментатор на этот раз потерял контроль над действиями своих менее опытных сотрудников.

Существует что-то вроде заколдованного круга: нельзя сделать научную работу без ясного понимания проблемы, но нельзя добиться ясного понимания, не сделав работу. . . Здесь опасны обе крайности: и стремление все понять, а потом работать — это сковывает инициативу; и желание схватить на лету, угадать результат, не понимая, — это ведет к верхоглядству.



В работе не должно быть спешки и суеты, как не должно быть и веры в собственную непогрешимость. Верить в свои силы необходимо, но убеждение в непогрешимости приводит к тому, что, раз выбрав неверное направление, человек будет упорно его держаться. Очень сложно, но нужно найти правильную меру уверенности и сомнения, колебаний и непреклонности, гибкости и негибкости...

**Секреты ремесла.** Существуют ли какие-нибудь чудесные секреты: как найти решение, как направить фантазию по нужному пути, как возникают скачки мысли, неожиданные сопоставления, озарения? В чем тайна творчества?

Есть удивительная область человеческой психики — подсознание. Здесь хранится накопленный опыт, опыт не только одного человека, но многих поколений, здесь рождается интуиция. Когда человек спасается от смертельной опасности, мгновенно



включается подсознание и ведет его коротким, лучшим путем. Это «нижний этаж» обычного человеческого сознания; на «верхнем этаже» рождаются слова, понятия, на «нижнем» — образы. И бывает, что образ подсказывает решение!

Однажды, когда я бился над тем, как найти формулу, которая давала бы вероятность вылета электрона из атома при ядерных столкновениях, то увидел во сне, что по арене цирка скачет наездница, резко останавливается — и цветы, которые она держит в руках, летят в публику. . . Я понял, что в системе координат, где ядро покоится после столкновения, проще описать состояние вылетающих электронов. Но не спешите укладываться спать, великий французский ученый Луи Пастер говорил, что случай помогает только подготовленному уму. Может быть, если бы этот сон увидела сама наездница, он подсказал бы ей совсем другое — как поставить новый номер; а лошадь радостно поняла бы, что если как следует остановиться на полном скаку, то со спины слетят не только цветы, но и наездница.

Чтобы хорошо работать днем, очень важно поработать накануне вечером, «дать задание» подсознанию, направить его на верный путь, определить круг понятий, в котором можно найти разгадку. Если бесчисленное множество раз повторить рассуждения и вычисления, проделывая их без бумаги, в уме, — скоро решение придет само собой.

Сделать серьезную работу можно упорными неотступными усилиями, решением вспомогательных задач, подходами с разных сторон. . . Нужно отбросить все посторонние мысли, довести себя до состояния высшего вдохновения, когда сознательная работа продолжается во сне, а подсознательная — наяву. . . Для этого нужно многое — взволновавшая до глубины души задача, владение техникой решения, безупречное здоровье, огромное мужество, чтобы поверить в

свои результаты, способность не испугаться собственных выводов, если они расходятся с общепринятыми, и умение довести работу до конца.

Да, внезапное озарение приносит успех, но не забывайте о том, что озарение рождается упорным трудом.

**Профессия физика.** Что может быть важнее в жизни человека, чем выбор профессии? Пожалуй, это первый самостоятельный выбор — ведь мы не выбираем себе место рождения или школу, в которой будем учиться; пока мы не выросли, за нас это часто делают родители, воспитатели. Но если нам выбирают профессию, к которой мы не чувствуем любви, не имеем способностей, — беды не миновать. Как часто человек, занимающийся не своим делом, губит собственную жизнь, а иногда и приносит вред окружающим. Что если свою профессию не любит врач, учитель или летчик? Пусть те из вас, кто заинтересовался физикой, постараются лучше понять, что представляет собой эта наука и подходит ли она вам по вашим склонностям и способностям.

**Теоретическая и экспериментальная физика.** В прошлом веке, когда физика не была еще так специализирована, многие ученые занимались одновременно и теорией, и экспериментом.

Джеймс Клерк Максвелл теоретически получил замечательные уравнения, объединившие электричество, магнетизм и оптику; в то же время он был профессором экспериментальной физики в Кембридже, создателем знаменитой Кавендишской лаборатории, изобретателем приборов. Генрих Герц, экспериментально обнаружив электромагнитные волны, построил теорию распространения электромагнитных волн, развивая открытие Максвелла. Но все же можно сказать, что главная профессия Максвелла — теоретическая физика, а Герца — экспериментальная.

В наше время итальянский физик Энрико Ферми, создавший теорию радиоактивного распада, вместе с учеными своей группы экспериментально установил, что почти все элементы делаются радиоактивными при бомбардировке нейтронами. Но о Ферми мы говорим — «теоретик». Советский ученый академик Г. И. Будкер совмещал занятия теоретической физикой с разработкой замечательных инженерных идей. Он теоретически разработал ускоритель на встречных пучках заряженных частиц и руководил его созданием. В таком ускорителе вся энергия идет на рождение новых частиц, тогда как при столкновении энергичной частицы с неподвижной мишенью на рождение идет только малая доля.

Но сейчас эти две профессии совмещаются крайне редко. Каждая из них требует специальных знаний: эксперимент — знания методов измерения, теория — владения сложным математическим аппаратом. А главное, что теоретика и экспериментатору нужен разный тип мышления и разные формы интуиции — теория, имеющая дело с более отвлеченными понятиями, требует и более абстрактной интуиции.

Экспериментаторы изучают соотношения между физическими величинами, измеряя их с помощью приборов; теоретики выводят новые соотношения, пользуясь только бумагой и карандашом, используя все известные правила и законы, интуитивные догадки.

У истоков теоретической физики стоял Исаак Ньютон. Чтобы объяснить, почему планеты движутся по эллипсам с фокусом у Солнца и почему кубы радиусов орбит пропорциональны квадратам периодов обращения, он предположил, что между двумя массами действует сила, пропорциональная их произведению и обратно пропорциональная квадрату расстояния между телами. Ньютон сформулировал основные законы классической механики. Он преодолел

огромные по тому времени математические трудности и получил количественное объяснение движения планет, вычислил возмущения движения Луны под влиянием Солнца, построил теорию приливов... Теоретическая физика началась с того, что Ньютон превратил недоказанную идею всемирного тяготения в физическую теорию, подтвержденную опытом.

Великим физиком-теоретиком нашего века был Альберт Эйнштейн. Теорию относительности, открывшую совершенно новое понятие пространства-времени, он создал, пользуясь только бумагой и карандашом. Оказалось, что время течет по-разному в неподвижной системе и в равномерно движущейся. Формулы Эйнштейна были с огромной точностью подтверждены результатами экспериментов последних десятилетий: быстро движущиеся нестабильные частицы, такие, как пи-мезоны или мюоны, распадаются медленнее, чем неподвижные.



Каждое произведение искусства говорит нам о том, каким был его автор, о его мыслях и чувствах, даже одну и ту же сказку разные люди рассказывают по-разному. У каждого автора существуют особые приемы, свои образы, своя манера изображения — то, что называется стилем. Стиль работы существует и у физиков-теоретиков. Одним важно получить результат любым способом, другие разрабатывают наиболее подходящий к задаче метод, добиваясь более глубокого понимания. Одни решают задачи, которые прямо не связаны с опытом; другие работают в тесном контакте с экспериментаторами, теоретически анализируя эксперимент или планируя будущие опыты. Есть теоретики, предпочитающие строгий математический подход, а иным важнее подход качественный, когда результаты получаются на простых моделях и по возможности наглядно.

Среди физиков-теоретиков нашей страны были представители разных стилей.

Лев Давыдович Ландау сочетал глубокое качественное понимание проблем с виртуозным владением математическим аппаратом. Владимир Александрович Фок строго математически формулировал задачи. Игорь Евгеньевич Тамм изучал приближенные модели или использовал приближенные методы для решения сложной задачи. Николай Николаевич Боголюбов сочетает математику и теоретическую физику, он строгими методами изучает сознательно упрощенные модели явлений. Исаак Яковлевич Померанчук строил теории явлений, вскрывающих самые глубокие свойства мира, — его работы всегда оказывались на переднем крае науки. Яков Ильич Френкель выдвигал громадное количество идей, не стремясь довести исследование до конца, только качественно рассматривая задачи.

Чем сейчас занимается теоретическая физика? Важную задачу науки немецкий ученый Вильгельм

Оствальд формулировал так: «... находить соотношения между определенными и измеримыми величинами, чтобы из одних могли быть выведены другие». Это направление тесно связано с экспериментом, на нем основана, в частности, прикладная физика, дающая множество практических применений. Так, пользуясь законами движения электронов в металле, теоретики рассчитали кривую зависимости электрического сопротивления от температуры и объяснили природу сверхпроводимости.

Сущность другого направления развития науки определил ирландский математик Уильям Гамильтон: «Продвигаясь путем развития наших физических представлений, наука может продвигаться также и по пути изобретения новых математических методов». Теоретическая физика использует и развивает методы математики, которые помогают открывать свойства симметрии законов природы.

И наконец, главное — воспользуемся словами великого немецкого поэта Фридриха Шиллера: «Старайтесь найти вечный закон в чудесных превращениях случая, отыскать неподвижный полюс в бесконечной веренице явлений...» Наука открывает и исследует общие принципы, которые лежат в основе мироздания, такие, как причинность, свойства симметрии, законы сохранения... Так, квантовая механика обобщила классическое понимание причинности; теория элементарных частиц основывается на внутренних симметриях элементарных частиц; теория относительности — на симметрии пространства-времени...

Итак, теоретическая физика намечает пути к пониманию единства, симметрии и динамики явлений природы, к пониманию красоты Вселенной.

Но не будем забывать про эксперимент — любое теоретическое построение станет научной истиной, только подтвердившись экспериментом и дальнейшим

развитием теории. Задача экспериментальной физики — подтверждение или опровержение теоретических предсказаний на опыте, поиски новых неожиданных соотношений. Дальше речь пойдет именно о теоретической физике, поскольку это моя профессия, говорить о ней мне легче и интереснее.

**Физика и математика.** Макс Борн — немецкий ученый, один из основателей квантовой механики — сказал: «Математический формализм оказывает совершенно удивительную услугу в деле описания сложных вещей. . .» Действительно, количественное описание физического мира невозможно без математики — она дает способ решения уравнений, методы описания, она открывает красоту опытных наук. Многие симметрии можно увидеть только с помощью сложнейших математических построений, после искусных преобразований.

Мы начали со слов Макса Борна, но привели только первую половину его высказывания о математическом формализме, а вторая вот: «. . . но он несколько не помогает в понимании реальных процессов».

Математические построения не зависят от свойств окружающего мира, математика не интересуется, для каких физических величин будут использованы уравнения, поэтому математика стала универсальным инструментом для всех естественных наук. Все выводы математики должны быть логически строгими и безупречными, вытекающими из принятых аксиом.

Физика старается нарисовать по возможности точную картину мира, используя и недоказанные предположения, оценивая, насколько они убедительны, угадывая, какие недостающие соотношения реализуются в природе. Если математик исследует все возможные типы геометрий, то физик выясняет, какие именно геометрические соотношения осуществляются в нашем мире.

Физик думает не столько о методах решения,

сколько о том, законны ли сделанные упрощения, с какой точностью и при каких значениях переменных найденные уравнения правильно описывают явление и, главное, что произойдет, если результат подтвердится или будет опровергнут опытом, от каких предположений придется отказаться, как изменится наш взгляд на все другие известные явления.

Если случится, что все результаты какой-либо области физики можно будет вывести из нескольких строго установленных экспериментально аксиом, эта область станет разделом прикладной математики или техники, как это произошло с классической механикой, электродинамикой, теорией относительности. Теоретические построения в физике требуют постоянного согласования с уже известными законами природы, с тем, что мы знаем об окружающем мире. Физическая теория не логическая конструкция, а здание, построенное на правдоподобных предположениях, которые предстоит проверить.

Физика и математика — науки с разными целями и разными подходами к решению задач.

**Как работают физики-теоретики.** «Догадка предшествует доказательству», — утверждал великий французский математик Анри Пуанкаре, имя которого еще не раз встретится вам на страницах этой книги. Прежде чем искать результат, нужно угадать возможное решение.

Можно принять такую последовательность действий в теоретической физике.

Сначала попытаться решить задачу самому, ничего не зная о том, как ее пробовали решать другие. Сделав первые качественные оценки порядков величин, предположив направление поисков, вы будете уже совсем по-другому читать литературу, активно, прикидывая тут же, как действовать дальше. Попутно выясняется, как могут ограничить область возмож-



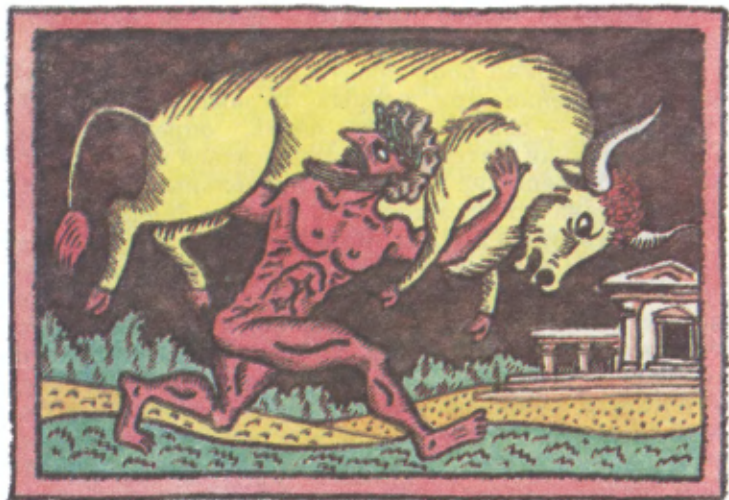
ных решений общие принципы физики, например законы сохранения.

Теперь можно попробовать найти грубое качественное решение при разных параметрах задачи. Параметры — совокупность чисел, определяющих условия задачи. Затем нужно попытаться найти количественное решение задачи в предельных случаях, когда задача упрощается... Но начнем сначала.

**Качественный анализ.** Качественный анализ едва ли не самая важная стадия работы, когда почти без всяких вычислений получаются грубые соотношения между величинами, проясняется физическая картина явления. Один из главных элементов качественного анализа — решение задачи на упрощенных моделях, в которых отброшено все несущественное. Чтобы упростить задачу, надо знать, чем можно пренебречь.

Вы, наверно, слышали легенду о том, как воспитатели знаменитого силача упрощали сложную задачу: чтобы богатырь мог носить на плечах огромного быка, они с детства заставляли его носить маленького теленка. Теленок рос, но мальчик не замечал этого, поднимая его ежедневно, и вот в один прекрасный день люди увидели взрослого мужчину, легко несущего могучее животное.

Попробуем определить период колебаний маятника. Первым делом надо выяснить, какие величины войдут в выражение. Маятник движется к положению равновесия под действием силы тяжести, значит, период может зависеть от ускорения силы тяжести  $g$  и от массы маятника  $m$ . Сделаем первое небольшое упрощение — предположим, что тяжелый груз с массой  $m$  подвешен на легком стержне, и пренебрежем массой этого стержня. В выражение может войти длина маятника  $l$ . Если пренебречь затуханием колебаний, в задачу не войдет вязкость и температура воздуха; не учитывая ускорения точки подвески маятника вместе с Землей, отбрасываем скорость враще-



ния Земли. . . Из того, что осталось, — ускорения силы тяжести, массы и длины — можно составить только одну комбинацию, имеющую размерность времени:

$\sqrt{l/g}$ . Эта комбинация и будет определять период  $T$ .

Масса в задачу не вошла. Итак, мы без вычислений узнали, что период колебаний маятника не зависит от его массы и пропорционален корню квадратному из его длины. Вам встретилось слово «размерность». Что это такое?

Размерность показывает связь физической величины с системой единиц измерения. Например, скорость имеет размерность длины, деленной на время. Численное значение длины стола имеет размерность длины и зависит от того, в сантиметрах или в миллиметрах она измеряется. А вот отношение длины стола к ширине не зависит от единиц измерения — это безразмерная величина.

**Осцилляторы.** Системы, колеблющиеся около положения равновесия, называют осцилляторами. Наш маятник — осциллятор. Другой пример — грузик на пружинке.

Отклоняясь от положения равновесия, грузик приобретает потенциальную энергию, когда же он возвращается, потенциальная энергия превращается в кинетическую. В положении равновесия его скорость максимальна, он по инерции проскакивает дальше, и в точке наибольшего отклонения вся кинетическая энергия переходит в потенциальную, и все начинается сначала.

Остановим грузик — в положении равновесия его энергия минимальна, кинетическая и потенциальная энергии равны нулю. Но как одно животное — слон — не похоже на другое — корову, хотя оба принадлежат к одному классу млекопитающих, так же не похожи друг на друга и осцилляторы. Колебательный контур — вот еще один осциллятор. Это катушка проволоки, концы которой присоединены к конденсатору. Если в катушку вставить и вытащить магнит, в ней произойдет изменение магнитного поля, возникнет электродвижущая сила, появится ток — на обкладках конденсатора будут накапливаться заряды. По инерции зарядов накопится слишком много, и процесс пойдет в обратном направлении, как у маятника, — вот в чем родство. Потенциальная энергия осциллятора — колебательного контура — энергия электрического поля в конденсаторе, пропорциональная квадрату заряда на обкладках; а кинетическая — энергия магнитного поля в катушке, пропорциональная квадрату тока, или, что то же самое, квадрату скорости изменения заряда на обкладках.

Как бы ни был устроен осциллятор, его энергия состоит из двух слагаемых: потенциальной, пропорциональной квадрату некой величины, которую мы назовем обобщенной координатой, и кинетической,

пропорциональной квадрату скорости изменения обобщенной координаты.

Для грузика на пружинке обобщенная координата — смещение грузика от положения равновесия; для колебательного контура — заряд на обкладках конденсатора. Совсем не обязательно обобщенной координате иметь размерность длины.

Найдем частоту колебаний обобщенного осциллятора  $\omega$  — формула будет справедлива сразу для всех возможных осцилляторов. Потенциальную энергию можно записать в виде:  $\gamma q^2/2$ . По аналогии с грузиком на пружинке назовем величину  $\gamma$  жесткостью осциллятора — для грузика это жесткость пружины. Кинетическая энергия  $a\dot{q}^2/2$ . Через  $\dot{q}$  мы обозначили скорость изменения по времени обобщенной координаты, или обобщенную скорость;  $a$  играет роль массы осциллятора.

Максимальная кинетическая энергия осциллятора равна максимальной потенциальной:  $\gamma q_m^2/2 = a\dot{q}_m^2/2$ .  $\dot{q}$  можно оценить, как  $\omega q_m$ , где  $\omega$  — угловая частота,  $\omega = 2\pi/T$ . Для осциллятора это даже не оценка, а точный результат. Из равенства потенциальной и кинетической энергии сразу же получаем:  $\omega^2 = \gamma/a$ , или  $\omega = \sqrt{\gamma/a}$ .

Для грузика на пружинке  $a$  нужно заменить на массу грузика, и наша формула даст частоту колебаний. Те, кто знает, что такое самоиндукция и емкость, могут найти по этой формуле частоту колебаний колебательного контура. Потенциальная энергия — энергия конденсатора — равна  $q^2/2C$ , так что  $\gamma = 1/C$ . Кинетическая энергия равна  $L\dot{q}^2/2$ , где  $L$  — коэффициент самоиндукции; он играет роль эффективной массы  $a$ . Подставляя в нашу формулу, получаем  $\omega = 1/\sqrt{LC}$ .

**Поиски решения.** На основе анализа размерностей можно, еще до того как найдены уравнения, выяснить некоторые свойства решения. Попробуем, например,

найти силу сопротивления при движении тела в жидкости или газе.

Двигаясь, тело увлекает за собой жидкость; ближний к телу слой жидкости движется со скоростью тела, другой слой, находящийся на расстоянии, движется медленнее и тормозит движение первого. Чем дальше слой, тем медленнее он движется. Резкость изменения скорости слоев жидкости по мере удаления от тела характеризуется градиентом скорости. Градиент скорости показывает изменение скорости на единицу длины. Тормозящая сила  $f$ , действующая на единицу поверхности, равна коэффициенту вязкости  $\eta$ , умноженному на градиент скорости.

Предположим, что в жидкости движется шар радиуса  $R$  со скоростью  $v$ . Градиент скорости можно оценить как отношение скорости к тому расстоянию, на котором скорость резко падает. Но, двигаясь достаточно медленно, тело размера  $R$  заставляет двигаться частицы среды — жидкости или газа, — находящиеся на расстоянии порядка  $R$ ; на больших расстояниях жидкость почти неподвижна. Поэтому градиент скорости имеет порядок  $v/R$ . Итак,  $f = \eta v/R$ .

Найдем силу  $F$ , действующую на весь шар, — помножим силу  $f$ , действующую на единицу поверхности, на всю поверхность:  $F = f4\pi R^2$ . Подставляя  $f = \eta v/R$ , получим  $F = 4\pi\eta vR$ .

Мы сделали грубую оценку. Точное решение этой задачи с помощью уравнений гидродинамики дает множитель  $6\pi$ , а не  $4\pi$ . Итак, мы ошиблись только в численном множителе!

Эта формула понадобилась, когда Эйнштейн строил теорию броуновского движения — движения шариков смолы в жидкости под влиянием случайных ударов молекул. Из нее нетрудно вычислить, с какой скоростью будут оседать шарики под действием силы тяжести, — для этого надо приравнять силу трения к



силе тяжести  $mg$ , где  $m$  — масса шарика. Скорость оседания будет  $v = mg/6\pi\eta R$ .

Следующая стадия работы — получение точных количественных соотношений с помощью математического аппарата теории — целиком опирается на первую, на качественный анализ.

**Почему дельфин не устает?** Вернемся к задаче о силе сопротивления при движении тела в жидкости или газе. Мы уже рассмотрели один предельный случай — нашли тормозящую силу в жидкости при малой скорости тела. Когда же тело движется быстро, давление жидкости на его заднюю сторону уменьшается из-за вихревого движения — турбулентности. В чем же особенности этого предельного случая?

При достаточно большой скорости сила сопротивления не зависит от вязкости, а полностью определяется количеством движения, которое передает тело за единицу времени, толкая жидкость перед собой. Какой объем жидкости вовлечен в движение за единицу времени? Он будет равен площади тела  $\pi R^2$ , помноженной на путь, пройденный телом за это время, — этот путь и есть скорость тела  $v$ . Значит, объем равен  $\pi R^2 v$ . Умножая на плотность жидкости  $\rho$ , получим массу, вовлеченную в движение за единицу времени, а умножив массу на скорость, получим передаваемый за единицу времени импульс, т. е. искомую силу сопротивления.

Итак, в предельном случае больших скоростей сила лобового сопротивления равна  $F = \pi R^2 \rho v^2$ .

Чтобы понять, что будет в промежуточном случае, призовем на помощь уже известные нам размерные оценки. Из величин, входящих в задачу, —  $v$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $R$  — можно составить только одну безразмерную комбинацию:  $R = \eta v R / \rho$ . Величина  $R_e$  называется числом Рейнольдса, она показывает отношение сил инерции к силам вязкости.

Сила сопротивления при произвольной скорости



равна  $F = 6\eta R \cdot \varphi(R_e)$ . Про функцию  $\varphi$  мы, не решая сложных уравнений, можем сказать, что при малых  $R_e$  она равна единице, чтобы получилось найденное раньше выражение, а при больших скоростях должна давать только что полученный нами предельный закон лобового сопротивления. Если приближенно изобразить эту функцию так, чтобы выполнялись оба предельных случая, получится  $\varphi = 1 + 1/6 R_e$ . Конечно, эта формула очень грубая. Из нее следует, что сила сопротивления для малых скоростей изменяется вдвое при  $R_e$  порядка 6. Точный, очень сложный расчет показывает, что на самом деле турбулентность, искажающая формулу малых скоростей, возникает при критическом числе Рейнольдса порядка 100. Но ведь обычно числа, полученные из уравнений теоретической физики, порядка единицы? Да, из любого правила бывают исключения, в том числе и из этого.



Вот так, изучив предельные случаи, когда задача легко решается, мы получили некоторое, правда грубое, представление о зависимости силы сопротивления от скорости и увидели, что для точного решения задачи достаточно найти только одну неизвестную функцию  $\varphi(R_e)$ .

А не попробовать ли оценить число Рейнольдса для быстро мчащегося дельфина? Мы получим удивительный результат. Число Рейнольдса окажется больше критического — лобовое сопротивление должно быть очень велико, — где же берутся силы у дельфина, день-деньской носящегося по волнам? Природа позаботилась об этом симпатичном создании — придала его телу обтекаемую форму и устроила так, что благодаря смазке и движению кожи турбулентность не возникает — сила сопротивления мала, ее следует рассчитывать по формуле для малых скоростей.

**Сто тысяч «почему».** После каждого шага вперед обязательно надо оглянуться назад, попытаться опровергнуть то, что получилось. Не слишком ли легко найден результат? Почему вдруг исчезли трудности? Не потому ли, что найден обходный путь, мудреный прием? И очень часто при проверке оказывается, что либо задачу можно решить и прямым путем, либо что мудреный прием ошибочен.

Достаточно ли красиво то, что получилось? Иногда важны даже внешние признаки красоты, некрасивые выражения часто оказываются неверными. Если в формуле стоят огромные или неправдоподобно малые числовые множители, это некрасиво, как если бы на картине у человека было пятнадцать носов либо не было бы ни одного. Но, конечно, гораздо важнее тонкие, глубокие признаки красоты, когда выражение в простой форме связывает разнородные явления, когда устанавливаются неожиданные связи. Требование красоты соблюдается не так строго, как, скажем, закон сохранения энергии, но оно очень часто помога-

ет выбрать правильный путь и открывать новые законы.

Результаты нужно тысячу раз проверить, проанализировать, выслушать критику всех, кто занимался подобными проблемами. Так сказано в мудрой сказке Андерсена про лен, который освещало солнце, поливал дождь, потом люди вырвали его с корнем, положили в воду, держали над огнем, мяли, тискали, трепали, чесали, переворачивали с боку на бок... Когда он превратился в полотно, его резали, кроили, кололи иглками; когда полотно изнашивалось, его порвали, изрубили, измяли, варили, давили — и вот оно превратилось в тонкую белую бумагу, и на ней написали чудеснейшие рассказы, и люди, читая их, становились добрее и умнее. . .

Когда выбор сделан. Итак, вы решили, что обладаете всем, что нужно для занятий теоретической физикой, — любопытством, настойчивостью, сильной волей, интуицией . . .

Но, может быть, для науки необходим какой-то необыкновенный ум, не такой, как у всех? Нет, для всех дел нужен более или менее одинаковый ум. Здравый смысл подсказывает пешеходу, в каком месте переходить улицу, и он же вместе с интуицией и фантазией служит ученому, открывающему законы природы. Существует множество рассказов о рассеянности и непрактичности ученых, но, в сущности, это просто свидетельство их сосредоточенности на своих проблемах.

Обычный человеческий здравый смысл берет на себя львиную долю научной работы. Он превращает движение к результату в последовательное преодоление небольших трудностей, так что на долю интуиции остаются сравнительно небольшие скачки в сторону.

Я расскажу вам о том, как я начинал работать в науке. Делаю это не для того, чтобы вы руководство-

вались моим примером, а просто потому, что о пережитом говорить легче и рассказ выйдет убедительнее.

Мне было двенадцать лет, когда я раздобыл книгу Доната «Физика в играх». Прочитав ее, я стал делать физические игрушки и даже придумывать новые. Отсюда прямой путь к созданию разных физических приборов: я сделал тепловой ограничитель тока собственной конструкции и, конечно, отдал дань тогдашнему всеобщему увлечению — детекторным радиоприемникам. Это было непросто — ведь никаких деталей в продаже в то время не было.

После окончания школы я работал лаборантом по физике, опубликовал в журнале заметку о приборе для проверки второго закона Ньютона. Но по-настоящему стал заниматься физикой, поступив в Ленинградский государственный университет. Студентом второго курса я попал на практику в лабораторию завода «Электроприбор» — сейчас он называется «Вибратор» — и узнал, что большая партия вольтметров попала в брак. Когда их включали в сеть переменного тока, положение конца стрелки размывалось на несколько миллиметров. Почему же это происходит? Ясно, что дело в резонансе, но какая именно часть стрелки входит в резонанс и как это исправить . . .

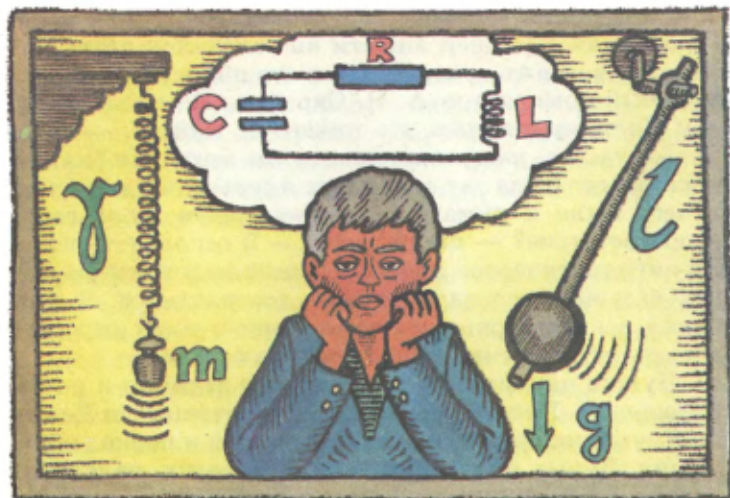
Я вытащил стрелку и закрепил ее на станине частотометра, который измеряет частоту переменного тока; подложил под нее миллиметровую бумагу и, меняя обороты генератора, дающего ток, нарисовал кривую зависимости амплитуды колебаний конца стрелки от частоты тока. Это была типичная резонансная кривая, только максимум у нее был на семидесяти периодах в секунду, а в приборе максимум был на пятидесяти периодах — в чем же дело? Но, чтобы сразу не запутаться, я отложил этот вопрос в сторону и занялся стрелкой.

Прощарапав на ней небольшие точки в разных местах, я освещал их по очереди боковым светом и наблюдал под увеличением, как движутся светящиеся точки. С помощью микроманипулятора можно было определить амплитуду колебаний различных частей стрелки, и оказалось, что ее длинная часть вся поворачивается вокруг оси, проходящей через вертикальное колено. Когда я рассчитал частоту колебаний, она составила около семидесяти периодов в секунду; значит, все правильно. Теперь можно решать вопрос посложнее: почему резонансная частота в приборе становится меньше?

Стрелка в приборе скреплена с рамкой, по которой течет ток, и эта рамка сама может колебаться, значит, нужно решать задачу о двух связанных колебательных системах. Расчет показал, что частота стрелки, скрепленной с подвижной рамкой, действительно должна понижаться с семидесяти до пятидесяти периодов в секунду. Оставалось только рассчитать, как изменить толщину стрелки, чтобы уйти от резонанса. Когда и это было сделано, изготовили серию новых приборов — и стрелка в них стояла как вкопанная!

После этого мне предложили работать в заводской лаборатории параллельно с учебой в университете. Я согласился и не пожалел об этом — за это время я научился самостоятельно ставить и решать прикладные теоретические задачи. Это очень пригодилось в дальнейшем.

Как и большинству физиков-теоретиков, мне приходилось работать в разных областях физики. Атомная физика, космические лучи, теория металлов, атомное ядро, квантовая теория поля, астрофизика — я считаю, что все эти области нашей науки чрезвычайно интересны. Сейчас наиболее принципиальные вопросы решаются в теории элементарных частиц и в квантовой теории поля, но, конечно, и в дру-



гих областях есть множество интересных нерешенных задач. И конечно, их очень много в прикладной физике. Вот несколько советов, которые вы, наверно, уже слышали от ваших учителей.

Прочитайте замечательные «Фейнмановские лекции по физике», написанные известным американским физиком Ричардом Фейнманом, одним из создателей современной квантовой электродинамики. Читайте активно, пытайтесь решать поставленные в книге задачи, не заглядывая в ответ.

Очень важно научиться подкреплять свои догадки вычислениями; для этого нужно постараться запомнить все важные физические константы и соотношения, чтобы представлять себе порядки величин. Нужно почувствовать любовь к элементарным навыкам ремесла. Они должны войти в ваше сознание крепко-накрепко, так, чтобы вы, применяя технический прием, даже не замечали этого.

Наш замечательный поэт Борис Пастернак вспоминал, как в ранней юности он готовился стать музыкантом, и в этом стремлении его поддерживал знаменитый композитор А. Н. Скрябин. Но очень скоро сам Пастернак понял, что ничего не выйдет, — сочинять музыку, импровизировать он мог и любил, но техника его была так слаба, что о серьезных занятиях нечего было и думать. «Как возможно было такое несоответствие? — пишет поэт. — В основе его лежало нигилистическое пренебрежение недоучки ко всему, казавшемуся наживным и достижимым. Я презирал все нетворческое, ремесленное, имея дерзость думать, что в этих вещах разбираюсь...»

Нужно научиться делать оценки величин и их соотношений. Попробуйте оценить расстояние от Земли до Луны, зная ускорение силы тяжести и период обращения Луны; подумайте, какая энергия падает на Землю в виде космических лучей; сравните тепловую отдачу свечи, электрической плитки и человека. Найдите в таблицах физических величин вязкость и плотность воздуха и оцените скорость падения капель дождя и предельную скорость парашютиста в затяжном прыжке. Проверьте, правильно ли это сделано, оценив число Рейнольдса в первом и во втором случае.

Не старайтесь с самого начала понимать все до конца. Понимание приходит постепенно и обязательно приводит к новым результатам, но только после того, как хорошо поработаешь.

И еще раз: главным должен быть интерес к делу, а не стремление к эффектным результатам; упорное добросовестное исследование — на этом пути каждый шаг принесет вам ни с чем не сравнимую радость.

Мы сделали первый виток — узнали, что такое научный метод — основа любой науки, что такое научное творчество, коснулись секретов ремесла физика-теоретика. Поднимемся выше — к основным принципам познания естественных наук, к сложному и удивительному миру симметрий.

**Принципы исследования.** Эйнштейн говорил, что основные фундаментальные идеи науки, в сущности, просты, их может понять каждый, но, чтобы увидеть все следствия, вытекающие из общей идеи, нужно владеть утонченной техникой исследования.

В естественных науках существуют специальные правила и законы, которые позволяют избегать ошибок и быстрее приходиться к цели.

Это принцип причинности, проверяемый на опыте; принцип наблюдаемости, сыгравший огромную роль в становлении физики XX в., — он требует, чтобы в науку вводились не умозрительные, а наблюдаемые величины; принцип соответствия, о котором мы уже упоминали, — он отражает преемственность науки; развитие науки стимулируют научные парадоксы, т. е. противоречие каких-то фактов привычным представлениям, уметь увидеть такое противоречие очень важно для ученого — убедительно обоснованные парадоксы много раз приводили к научным революциям; и наконец, не менее важное, чем все предыдущие, — требование красоты научной теории.

**Принцип причинности.** Ежедневно мы убеждаемся на собственном, иногда горьком опыте, что причина предшествует следствию: полученной двойке по физике предшествует длительная игра в хоккей или чтение детектива вместо учебника. Удару грома предшествует разряд, вспышка молнии. . . Но многовековая история науки учит не доверяться привычному,

сомневаться и проверять на опыте. Как же проверить, точно ли соблюдается причинность?

Когда на какое-нибудь тело падает электромагнитная волна, в виде кратковременного импульса, она вызывает рассеянную волну — тоже кратковременный импульс. Если причинность существует, всплеск рассеянной волны должен произойти после падающего всплеска. Из этого требования строго математически вытекает связь между вероятностями рассеяния и поглощения волн — дисперсионное соотношение. Можно проверять не запаздывание импульса, а выполнимость этого соотношения; подставляя в него полученные на опыте вероятности рассеяния и поглощения, обнаружили, что в пределах ошибок эксперимента нет нарушения причинности: следствие возникает позже причины.

Если спутать причину со следствием или принять за причину случайно сопутствующее обстоятельство, может возникнуть серьезная ошибка, заблуждение и даже суеверие. Перед дождем раки зарываются в песок, значит, сказали люди, перепутав причину и следствие, чтобы пошел дождь, надо закопать в песок рака! И если во время рачьих похорон случайно действительно пойдет дождь, ложное убеждение окрепнет и будет передаваться в устных легендах от поколения к поколению. Говорят, что, вымазав палец чернилами, можно превосходно выдержать самый коварный экзамен. Но чернильная клякса, случайно оказавшая на пальце у какого-то счастливицы, не причина пятерки, а одно из следствий упорных занятий. Это, конечно, не самое страшное, любую двойку можно исправить. Когда причину и следствие путает криминалист — в опасности судьба, а то и жизнь человека; когда их путает ученый — рождается лженаука.

То, что причинность была строго проверена на опыте, показывает важность этого принципа для науки — ведь научным утверждением считается то, что



можно подтвердить или опровергнуть, а то, что не подлежит проверке, хотя бы мысленной, лежит вне науки.

Принцип причинности в физике, в частности, требует исключить влияние какого-либо события на все прошедшие события и влияние друг на друга одновременных событий, происшедших на таком расстоянии, что они не могут быть связаны каким-либо сигналом, даже световым.

Принцип наблюдаемости. Люди давно поняли, как опасно вводить в науку умозрительные понятия, основанные только на повседневном опыте. Галилео Галилей призывал меньше доверять чувствам, которые легко могут обмануть, и стараться, рассуждая, подтвердить предположение или разоблачить его обманчивость.

Галилей и его великие современники всеми силами старались оградить науку от умозрительных пред-



ставлений, но лишь на рубеже XIX и XX вв. в физике возникло требование наблюдаемости вводимых понятий.

В конце прошлого века Анри Пуанкаре в своей статье «Измерение времени» подчеркивал, что необходимо ввести понятие времени, основанное на эксперименте.

В 1905 г. Альберт Эйнштейн проанализировал понятие одновременности. Как проверить одновременность? Абсолютна она или же относительна? Изменяется ли понятие одновременности в движущейся системе координат? И оказалось, что одновременность относительна...

Но о теории относительности речь впереди, пока скажем только, что она возникла как результат последовательно примененного принципа наблюдаемости.

Огромна роль принципа наблюдаемости в анализе физического смысла квантовой теории. Один из ее создателей, — английский физик Поль Дирак говорил: «Наука имеет дело только с наблюдаемыми величинами, и мы можем наблюдать объект только в том случае, если дадим ему взаимодействовать с чем-то внешним по отношению к нему». На наблюдаемость проверили понятия координаты и скорости частицы, и оказалось, что они принципиально неопределенны. Отсюда следует неопределенность некоторых предсказаний квантовой механики, тогда как все предсказания классической физики строго определены.

**Парадоксы движут науку.** Земля — это плоское тело, стоящее на спине трех китов, которые плавают по Мировому океану. Небо — это крыша, неподвижный свод, на котором укреплены звезды. Звезды расположены всегда одинаково, поэтому, если держать путь на звезду, придешь куда надо. Таково было привычное представление о космосе. Но стоило мореплавателям отплыть чуть подальше, увидеть новые гори-



зонты, как они обнаружили, сверяя путь по звездам, что картина неба изменяется. Чем дальше, тем больше таких фактов накапливалось, — так возник научный парадокс, а из него в конечном счете открытие, что Земля круглая.

Со времен Галилея было известно, что все тела падают с одинаковой скоростью. Значит, сила, с которой тело притягивается к Земле, строго пропорциональна его массе. Массе тела пропорциональны и силы инерции, которые возникают в ускоренно движущихся системах. Так как сила тяготения и сила инерции одинаково зависят от массы, предметы в свободно падающей камере находятся в состоянии невесомости: сила тяжести строго компенсируется силой инерции. Все это было известно много лет, и считалось само собой разумеющимся — так и должно быть, ничего странного. Увидеть и сформулировать парадокс было непросто. Это удалось сделать Эйнштейну: почему сила тяжести, независимо от состава тела, пропорциональна массе, мере инерции? Не следует ли из этого парадокса, что между инерцией и гравитацией есть глубокая внутренняя связь? С этой мысли началось построение одной из самых удивительных теорий — теории тяготения Эйнштейна.

Интереснейший парадокс возник не так давно. Все накопленные факты, все известное о свойствах элементарных частиц, доказывали, что адроны — самое многочисленное семейство элементарных частиц — состоят из кварков и антикварков, которые имеют дробный заряд. Физики абсолютно уверены в существовании кварков, но никто, никогда, ни в одном опыте так и не увидел ни одного кварка! Разрешить этот парадокс предстоит еще не завершенной теории сильного взаимодействия, согласно которой кварки — частицы особого рода, они существуют только в связанном состоянии, извлечь их из элементарных частиц нельзя.



Парадоксы важны не только для построения новых теорий, глобальных задач; умение отыскать и сформулировать парадокс — важный познавательный прием и в повседневной научной работе.

**Красота науки.** Анри Пуанкаре говорил: «Полезные комбинации — самые красивые. Специальное эстетическое чувство — ощущение красоты — играет роль тонкого решета... Тот, кто не владеет им, никогда не будет истинным творцом». Истинное всегда прекрасно, но скажем больше — прекрасное часто оказывается истинным.

Древнегреческий астроном Птолемей разработал математическую теорию движения планет вокруг неподвижной Земли, и эта теория позволяла вычислять их положение на небе. В 1542 г был написан главный труд великого польского ученого Николая Коперника «Об обращении небесных сфер», совершивший переворот в естествознании, объяснив-

ший движение небесных светил вращением Земли вокруг оси и обращением Земли и планет вокруг Солнца. Гелиоцентрическая система Коперника сменила сложную и путаную геоцентрическую систему Птолемея.

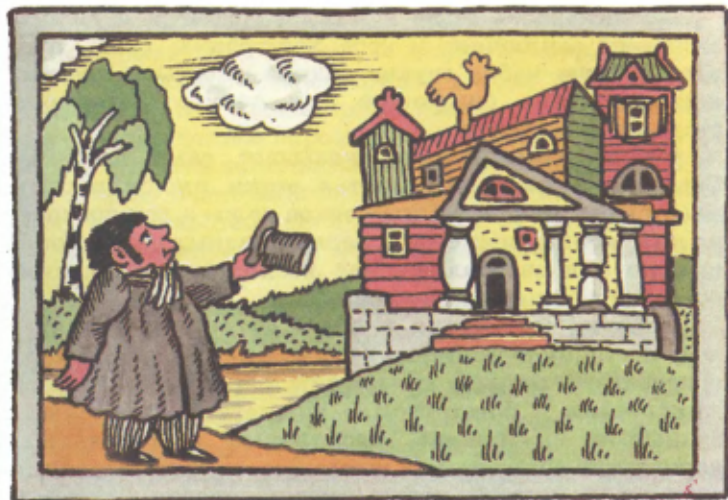
Согласно замечательной теории XX в. — теории относительности, законы природы можно формулировать в любой системе координат, даже во вращающейся. Во Вселенной не существует выделенной системы координат, и раз так, то обе точки зрения — и Птолемея, и Коперника — равноправны, первая принимает за систему отсчета Землю, а вторая — Солнце.

Но тут свое веское слово сказала красота — красота системы Коперника. Простота описания движения планет в гелиоцентрической системе так облегчает работу интуиции, что превращается в качественно новое явление, дает дорогу развитию теории. Открытие законов Кеплера, небесная механика Ньютона — следствия открытой Коперником красоты мира.

Физика ищет скрытую внутреннюю красоту мироздания, но и красота самой физической теории часто настолько убедительна, что заставляет физиков ставить сложнейшие эксперименты, чтобы подтвердить или опровергнуть сделанные предположения.

Когда ученый находит изящное построение, оно почти всегда или решает поставленную задачу, или пригодится в будущем для других задач. Поиски красоты ведут нас к познанию природы.

**Симметрия пространства и времени.** Соразмерность — таково древнее значение слова «симметрия». Античные философы считали симметрию, порядок и определенность сущностью прекрасного. Архитекторы, художники, даже поэты и музыканты с древнейших времен знали законы симметрии. Строго симметрично строятся геометрические орнаменты;



в классической архитектуре господствуют прямые линии, углы, круги, равенство колонн, окон, арок, сводов. Только такой субъект, как гоголевский Собакевич, мог вступить в спор с архитектором и настоять на своем — он заколотил на одной стороне все окна и вместо них провертел одно маленькое. «Фронтон тоже никак не пришелся посередине, — пишет Гоголь, — потому что хозяин приказал одну колонну сбоку выкинуть, и оттого очутилось не четыре колонны, а только три». Дом получился неуклюжий, вполне похожий на хозяина.

Конечно, симметрия в искусстве не буквальная — мы не увидим на картине человека слева и точно такого же справа. Законы симметрии художественного произведения подразумевают не однообразие форм, а глубокую согласованность элементов. Асимметрия — другая сторона симметрии, ни природа, ни искусство не терпят точных симметрий.

Правильность такта в музыке, размера и рифмы в поэзии заключает в себе волшебную силу, превращающую набор звуков разной высоты и продолжительности в симфонию или поэму. Симметрия рождает гармонию.

Идею симметрии подсказывает сама природа. Снежинки, кристаллы, листья, ветки, плоды, насекомые, рыбы, птицы, человеческое тело — все построено по законам симметрии, вернее, разных симметрий, именно они заставляют нас восхищаться красотой живой и неживой природы.

Понятие симметрии в науке постоянно развивалось и уточнялось. Наука открыла целый мир новых, неизвестных раньше симметрий, поражающий своей сложностью и богатством, — симметрии пространственные и внутренние, глобальные и локальные; даже такие вопросы, как возможность существования антимиров, поиски новых частиц, связаны с понятием симметрии.

**Симметрия пространства.** Самая простая симметрия — однородность и изотропность пространства. Красивое слово «изотропность» означает независимость свойств объектов от направления. Однородность пространства означает, что каждый физический прибор должен работать одинаково в любом месте, если не изменяются окружающие физические условия. Часы идут почти одинаково на Земле и на Солнце. Мы говорим «почти», потому что на поверхности Земли и Солнца поле тяготения не одинаковое, а, согласно теории тяготения Эйнштейна, вблизи тяжелых тел время идет иначе. Электрическая лампочка светила бы одинаково на Земле и на Солнце, если бы кому-нибудь нужна была электрическая лампочка на Солнце.

Благодаря изотропности пространства мы можем как угодно повернуть прибор: на Земле сила тяжести выделяет вертикальное направление, поэтому поста-



вить телефон на потолок непросто; но посмотрите, как работают со сложными физическими приборами космонавты на орбите, и любой прибор, повернутый под самым немислимым углом, дает точные показания. Эту симметрию знали уже в древнем мире, когда только зарождалась геометрия,— нужно было измерять земельные участки, площади и объемы и было очень важно, чтобы свойства материального треугольника не изменялись от поворота и в Древнем Египте были такими же, как в Древней Греции.

Понятие симметрии — соразмерности — относится не только к предметам, но и ко всем физическим явлениям и законам.

Итак, физические законы должны быть инвариантны — неизменны — относительно перемещений и поворотов.

**Однородность и обратимость времени.** Однородно не только пространство, но и время. Все физические процессы идут одинаково, когда бы они ни начались — минуту или миллиард лет назад. Свет далеких звезд идет до нас миллиарды лет, но длины волн света, излучаемого атомами звезд, такие же, как у земных атомов, электроны на далеких звездах движутся так же, как и на Земле. На этом примере с большой точностью установлена равномерность хода времени, и это означает, что во всякое время относительная скорость всех процессов в природе одинакова.

Законы природы не изменяются и от замены времени на обратное; посмотрев назад по времени, мы увидим то же, что впереди. Здесь каждый из вас может недоверчиво покачать головой, вспоминая собственный горький опыт: кто не стоял с осколками любимой бабушкиной чашки в руках, безнадежно пытаясь сделать, «как было»; кто не вспоминал, что вот минуту назад чашка была целой, и если бы...

И все-таки эта наблюдаемая в практической жизни необратимость кажущаяся. За ней стоит строгая обратимость механических законов. Но когда система сложная, нужно очень долго ждать, пока произойдет чудо и разбитая чашка снова станет целой, на это уйдет больше времени, чем существует Вселенная. Действительно, молекулы могут случайно так согласовать свои движения, что невероятное случится. В простых системах вероятность странных событий гораздо больше; там прямо можно наблюдать одинаковость расположения событий вперед и назад по времени. В малом объеме газа молекулы то стекаются вместе, то растекаются, так что плотность только в среднем совпадает с плотностью газа, и характер этих колебаний совершенно симметричен относительно прошлого и будущего.

В механике и электродинамике обратимость времени прямо видна из уравнений; глубоко проанализировав другие явления, в том числе и биологические, физики пришли к заключению, что речь идет о всеобъемлющем свойстве Вселенной. Но оказалось, что в «слабом взаимодействии» элементарных частиц некоторые симметрии нарушаются (об этом мы еще будем говорить), в том числе и обратимость времени. Кроме того, симметрии нарушаются на космологических расстояниях и временах. Так как Вселенная двадцать миллиардов лет назад была сверхплотной, так как она с тех пор расширяется, существует слабое нарушение временной однородности и обратимости, но это практически не влияет на обычные земные эксперименты.

Симметрии, о которых мы рассказали, на научном языке формулируются так: все законы природы инвариантны относительно операции переноса в пространстве и времени и относительно поворотов в пространстве. Добавим: с очень большой точностью.

**Зеркальная симметрия.** Однажды профессор математики из Оксфорда доктор Доджсон разговаривал с маленькой девочкой. «В какой руке ты держишь апельсин? — спросил он. — В правой, — ответила девочка. — А девочка в зеркале в какой руке держит апельсин? — В левой. — Как же это объяснить? — спросил доктор Доджсон. — Очень просто, — сказала девочка. — Ведь если бы я стояла за зеркалом, апельсин был бы у моего зеркального отражения в правой руке». Доктор Доджсон (а он был автором знаменитой книги «Алиса в стране чудес» под псевдонимом Льюис Кэрролл) пришел в восторг от этого ответа и написал другую книгу — «Алиса в Зазеркалье». Героиня так описывает свой дом, отраженный в Зеркале: «Во-первых, там есть вот эта комната, которая начинается прямо за стеклом. Она совсем такая же, как наша гостиная, только там все наоборот!.. А книжки там очень похожи на наши, только слова написаны задом наперед. Я это точно знаю, потому что я показала им нашу книжку, а они показали мне свою!»

Если мы закрутим волчок налево, он будет крутиться и двигаться так же, как закрученный направо, только фигуры движения правого волчка будут зеркальным отражением фигур левого. Чтобы проверить зеркальную симметрию, можно построить такую установку, в которой все детали и их расположение будут зеркально симметричны прежним. Если обе установки будут давать одинаковый результат, значит, явление зеркально симметрично. Это требование соблюдается для зеркально асимметричных молекул: если они образуются в равных условиях, число левых молекул равно числу правых.

В истории физики был удивительный случай, когда открытие двух зеркальных форм вещества было сделано с помощью микробов! Когда через естественную виннокаменную кислоту проходит свет, он

изменяет направление поляризации (направление электрического поля в световой волне). Когда же свет пропустили через искусственную кислоту, с такими же физическими и химическими свойствами, как у натуральной, направление поляризации не изменилось. Основоположник современной микробиологии Луи Пастер предположил, что искусственная кислота состоит из двух зеркально симметричных форм, одна поворачивает направление плоскости поляризации направо, а другая — налево. В результате направление не изменяется. Для доказательства Пастер и использовал микробов, поедающих естественную виннокислотную кислоту. Колонию этих любителей полакомиться Пастер развел в искусственной кислоте. Микробы ели, и направление плоскости поляризации все больше и больше поворачивалось налево! Что же произошло? Микробы съели «правую» форму, к которой они привыкли в естественной кислоте, а ее зеркальное отражение с негодованием отвергли. Оно-то и повернуло плоскость поляризации налево. Так Пастер блестяще доказал свою гипотезу и установил, что даже низшие организмы различают два зеркальных отражения. Еще раз подтвердилась зеркальная симметрия: при любом способе искусственного получения вещества обе зеркальные формы появляются в одинаковом количестве.

Внешний облик человеческого тела приблизительно симметричен, а человеческий организм совершенно не симметричен, например, сердце слева, тогда как зеркальная симметрия требует, чтобы на Земле было равное количество лево- и правосердечных.

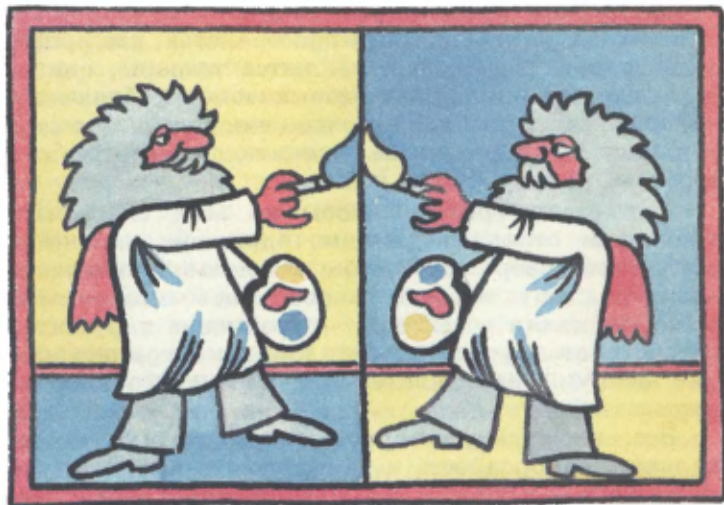
Почему же возникает зеркальная асимметрия в живой природе? На это может быть историческая причина — там, где возникла жизнь, случайно оказалось больше «правого» материала, и образовалась зеркальная форма, которая потом наследовалась.

Когда образовывались минералы, в окружающем пространстве могли быть сильные скручивающие напряжения или в жидкости — вихри, поэтому и получилось неравное количество «левых» и «правых». Пока это только одно из возможных объяснений.

Не исключено, что незначительное нарушение зеркальной симметрии в атомах и в ядерных силах, вызванное слабым взаимодействием, приведет к объяснению асимметрии в природе.

Еще один возможный источник асимметрии — вращение Земли. Но оно дает пренебрежимо малое преимущество одной из зеркальных форм по сравнению с другой.

**Повороты в пространстве-времени.** Замечательное свойство механических движений было обнаружено Галилеем: они одинаковы в неподвижной системе координат и в равномерно движущейся, на земле



и в летящем самолете. В 1904 г. нидерландский физик Хендрик Антон Лоренц обнаружил, что это свойство существует и в электродинамических явлениях. Попутно выяснилось важное обстоятельство: скорость заряженных тел не может превысить скорости света. Анри Пуанкаре показал, что результаты Лоренца означают инвариантность уравнений электродинамики относительно поворотов в четырехмерном пространстве, где кроме трех координат есть еще одна — временная. Эйнштейн обнаружил, что эта симметрия — всеобщая, что все явления природы не изменяются при таких поворотах. Мы не раз еще вспомним об этом, говоря о теории относительности.

Как проявляется эта симметрия в физических законах?

Все физические величины различаются по тому, как они изменяются при повороте. Совсем не изменяются скаляры; другие — векторы — ведут себя при поворотах как отрезок, проведенный из начала координат в какую-нибудь точку пространства; как произведение двух векторов изменяются тензоры; спиноры — это величины, из которых можно образовать квадратичную комбинацию, изменяющуюся как вектор, или скалярную, не изменяющуюся при поворотах.

Симметрия требует, чтобы во всех слагаемых уравнения стояли величины, одинаково изменяющиеся при поворотах. Так же как нельзя сравнивать время и длину, массу и скорость, невозможно приравнять скаляр к вектору — уравнение нарушится при повороте. Суть симметрии именно в этом разделении величин на скаляры, векторы, тензоры, спиноры...

Все симметрии, которые мы рассмотрели, — зеркальная, однородность и изотропность пространства и времени — в начале XX в. были объединены тео-

рий относительности в единую симметрию четырехмерного пространства-времени.

Все явления природы инвариантны относительно сдвигов, поворотов и отражений в этом пространстве.

**Симметрия физических явлений.** Кроме симметрии пространства-времени существует еще множество других симметрий, управляющих физическими явлениями, определяющих свойства элементарных частиц и их взаимодействий. Мы увидим, что каждой симметрии обязательно соответствует свой закон сохранения, который выполняется с такой же точностью, как и сама симметрия.

**Симметрия и законы сохранения.** По мере того как физики все глубже проникали в суть симметрий, им открывалась удивительная связь между свойствами симметрии и законами сохранения энергии, количества движения, электрического заряда...

Каждая симметрия обеспечивает свой закон сохранения. Закон сохранения энергии, например, связан с однородностью времени; закон сохранения количества движения или импульса — с однородностью пространства; закон сохранения момента — с симметрией относительно поворотов; закон сохранения четности — с зеркальной симметрией...

Если бы время шло неравномерно, изменялся бы относительный ритм процессов, могла бы, например, периодически изменяться постоянная всемирного тяготения. Было бы не только легко придумать вечный двигатель, но более того — он бы работал! Если бы постоянная всемирного тяготения перестала быть «постоянной», можно было бы поднимать грузы в период слабого тяготения и превращать приобретенную ими энергию в кинетическую, сбрасывая их в период сильного тяготения. Но уже Леонардо да Винчи в XV в. знал, что такая машина невозможна.

Изучая некоторые явления, физики замечали, что энергия будто бы не сохраняется, но каждый раз это кажущееся несохранение на самом деле означало переход энергии из одной формы в другую. Когда мы подбрасываем мяч, в верхней точке он на мгновение останавливается — и вся кинетическая энергия переходит в потенциальную. При превращении механической энергии в тепловую выделяется определенное количество тепла. Если работа совершается за счет охлаждения, тепло переходит в равное количество механической энергии.

Когда в 30-х гг. изучался радиоактивный распад, оказалось, что энергия вылетающих при распаде электронов меньше разности энергий ядер до и после распада. Физики предположили, что вместе с электронами вылетает нейтральная частица — нейтрино, унося излишек энергии. Существование нейтрино было затем доказано на опыте по его непосредственному действию на вещество. Энергия сохраняется с той же точностью, с какой соблюдается однородность времени.

Итак, каждой симметрии соответствует свой закон сохранения. И наоборот, когда какая-либо величина остается неизменной, значит, существует симметрия, обеспечивающая сохранение этой величины. Не удивительно, что законы сохранения энергии, импульса, углового момента соблюдаются во всех явлениях природы. Они есть следствие такого свойства нашего мира, как симметрия пространства и времени.

**Нарушение зеркальной симметрии.** Лет 30 назад произошло неожиданное. Оказалось, что заряженный  $K$ -мезон распадается двумя способами: на два или три пи-мезона, а зеркальная симметрия запрещает ему распасться обоими способами.

Зеркальная симметрия связана с законом сохранения — сохраняется величина, которая называется четностью. Что это такое?





Согласно квантовой механике, поведение частиц определяется волновой функцией, через которую квадратично выражаются физические величины. Свойства частиц не должны изменяться при зеркальном отражении, но волновая функция может изменить знак. Когда она не изменяет знака, состояние называется четным, а когда изменяет — нечетным. Значит, если существует зеркальная симметрия, каждая частица имеет определенную четность. Пи-мезоны, на которые распадается злополучный К-мезон, — нечетны. Сильно упрощая суть дела, скажем, что, если К-мезон четный, он может распадаться на две нечетные частицы, а если нечетный — только на три, но ни в коем случае не должен распадаться то так, то этак.

Примерно в то же время американские физики изучали  $\beta$ -распад кобальта, при котором из ядер вылетают электроны и антинейтрино. Оказалось, что электроны вылетают преимущественно под тупыми углами к направлению магнитного поля, в которое был помещен кобальт. По закону зеркальной симметрии, они должны были одинаково часто вылетать как под тупыми углами, так и под острыми.

Смятение физиков было таково, что они усомнились и в других свойствах симметрии пространства... Тогда Лев Давыдович Ландау и независимо Ли Цзундао и Янг Чжэнь-нин предположили, что участвующие в  $\beta$ -распаде электроны, нейтрино, нуклоны зеркально асимметричны и, чтобы восстановить симметрию, нужно перейти к античастицам. Казалось, что выход найден — асимметрия вылета объяснялась асимметрией участвующих частиц. Тогда асимметрия слабого взаимодействия не означала бы нарушения зеркальной симметрии пространства.

**Зарядово-зеркальная симметрия.** Для всех явлений природы, кроме слабых взаимодействий, существует еще зарядовая симметрия: законы природы не изменяются, если все электрические заряды заменить



на обратные. При этом изменяются на обратные и другие величины, о которых речь впереди.

Были предсказаны и обнаружены античастицы — позитрон, антипротон, антинейтрон и т. д. Из них можно составить ядро антиэлемента. Если к такому ядру, заряженному отрицательно, прибавить позитроны, получится антиатом, из антиатомов — антивещество с теми же свойствами, что и обычное вещество.

После опытов, о которых мы только что рассказали, зарядовую симметрию пришлось уточнить. Вместо нее существует зарядово-зеркальная симметрия: законы природы не изменятся, если все заряды в мире заменить на обратные и одновременно произвести зеркальное отражение. Антимир — зеркальное отражение нашего мира, у его обитателей сердце было бы с правой стороны, левая рука у них была бы более развита, антикнижки мы могли бы читать, только

поднеся их к зеркалу. Впрочем, антикнижку нам лучше не трогать — произойдет взрыв: аннигиляция частиц и античастиц.

Большинство астрофизиков считает, что антимиров нет. Дело в том, что на границах вещества и антивещества должна происходить аннигиляция электронов и позитронов — они превратились бы в пары квантов с энергией каждого 0,5 МэВ. Таких квантов должно было быть очень много во Вселенной, а их нет.

Зарядово-зеркальная симметрия тоже оказалась неточной — в опытах по распаду все того же  $K$ -мезона было обнаружено принципиально важное нарушение закона зарядово-зеркальной симметрии. Означает ли это асимметрию пространства, пока неизвестно.

**Спонтанное нарушение симметрии.** Большинство симметрий нарушается, если учитывать влияние более сложных взаимодействий; нарушаются (правда, крайне мало) даже законы сохранения, связанные с пространственно-временной симметрией, из-за неоднородности Вселенной в пространстве и времени.

Есть гораздо более важное — спонтанное — нарушение симметрии. Его примеры встречаются на каждом шагу: капля воды, лежащая на столе, — пример такого нарушения; было бы более симметрично, если бы вода размазалась по столу тонким слоем. Кристаллические решетки твердых тел — нарушение разных симметрий; однородное хаотичное расположение атомов, которое возникает при высокой температуре, полнее отражает симметрию, однородность и изотропность пространства. Но при достаточно низких температурах устойчиво асимметричное состояние твердого тела — кристаллическая решетка.

Симметричные уравнения могут иметь асимметричные решения. Теория элементарных частиц предполагает, что максимальная симметрия царствует на сверхмалых расстояниях, а на больших возникает

спонтанное нарушение, которое может сильно замаскировать симметрию. Симметрию не всегда легко увидеть.

**Неотличимость одинаковых частиц.** Существует очень важная перестановочная симметрия тождественных объектов: никакие физические явления не должны изменяться при перестановке двух одинаковых частиц, например двух электронов или двух нейтронов.

Что нужно сделать, чтобы не перепутать совершенно одинаковые карандаши? Выкрасить их в разные цвета? Или достаточно выкрасить только один? Если же еще немного подумать, станет ясно, что не стоит тратить краску: никто не выиграет, взяв чужой, но точно такой же карандаш, конечно, при условии, что отдаст взамен свой. Непреодолимые трудности для посторонних создают идентичные близнецы, особенно когда они для развлечения выдают себя один за другого. Их путает даже хорошо тренированная собака, когда они стоят рядом. Марк Твен, рассказывая о своем брате-близнеце, утонувшем в корыте, замечает: «Никто так и не узнал, кто на самом деле утонул, я или мой брат». Если они одинаковы, нельзя установить замену. Кто из них кто — это непроверяемый, а значит, и ненаучный вопрос.

Элементарные частицы можно представить себе как маленькие вращающиеся волчки, обладающие моментом количества движения, или угловым моментом. Согласно квантовой механике, угловой момент может принимать определенные значения, он изменяется скачками величины  $\hbar$  — постоянной Планка. Угловой момент, измеренный в единицах  $\hbar$ , называется спином. Спин бывает целый и полуцелый. Спин электрона в атоме водорода в состоянии с наименьшей энергией равен  $1/2$ , а в возбужденных состояниях:  $1/2, 3/2, 5/2...$  Спин атома гелия в основном состоянии 0, а в возбужденных: 0, 1, 2, 3...



Мы уже упоминали волновую функцию, описывающую поведение частиц, когда говорили о четности; она может изменить знак при зеркальном отражении, так вот при перестановке частиц волновая функция тоже может изменить знак. Замечательный швейцарский физик Вольфганг Паули в работе, оказавшей огромное влияние на всю последующую физику, показал, что при перестановке частиц с полуцелым спином волновая функция меняет знак, а при перестановке частиц с целым спином не изменяется. Он установил закон, который называется «запрет Паули»: две частицы с полуцелым спином не могут находиться в одинаковом состоянии. Ведь если они будут находиться в одинаковом состоянии, их перестановка не изменит волновой функции, тогда как теорема Паули требует, чтобы она изменилась, следовательно, она равна нулю. А волновая функция определяет вероятность нахождения частицы в данном состоянии, так что, если она равна нулю, такое состояние невозможно.

Мы еще не раз вспомним о запрете Паули, рассказывая об удивительных частицах — кварках.

## Как создавалась квантовая теория

Теперь мы можем через призму основных физических законов и принципов взглянуть на события науки XX в., проследить и понять, как рождаются физические теории.

Одним из важнейших событий в физике нашего века стало создание квантовой теории. Квантовая механика впервые установила скачкообразность процессов, настолько необычную с точки зрения классической физики, что даже Макс Планк, открывший дискретность изменения энергии излучателей электромагнитного поля, испугался своих результатов и старался найти им другое объяснение. Развитие квантовой механики привело к построению последовательной теории, описывающей движение микрочастиц.

**Поиски в потемках.** Как возникает теория? Сначала появляется глубокая и ясная физическая идея, скажем: «движение небесных тел, планет и звезд и падение камня на Земле вызваны одной причиной» или: «время течет по-разному в неподвижной системе координат и в равномерно движущейся», а уже из этих идей Ньютон выводил свою теорию тяготения, Эйнштейн — теорию относительности. С замечательной физической теорией современности — квантовой теорией — все было наоборот: ее главные результаты возникали раньше, чем становился понятным их смысл! Создание квантовой теории было движением в полутьме, на ощупь, через смутные догадки, которые часто не подтверждались и уводили в сторону, но зато удачи были поразительны, утверждения, по-

строенные на шатких основаниях, точнейшим образом подтверждались позже.

Постараемся почувствовать этот сложный и необычный ход идей.

Все началось с «катастрофы». Парадокс под мрачным названием «катастрофа Рэля — Джинса» достался физикам в наследство от прошлого века. Он возник, когда законы статистической физики применили к равновесному тепловому излучению, которое устанавливается внутри ящика с нагретыми стенками. Это излучение — стоячие электромагнитные волны. Статистическая физика установила закон равномерного распределения энергии: в тепловом равновесии на каждую степень свободы приходится одинаковая энергия, равная  $kT/2$ , где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура.

В одноатомном газе каждый атом имеет три степени свободы, соответственно трем направлениям движения — на каждый атом приходится энергия  $3/2 kT$ . В двухатомном газе каждая молекула может вращаться, каждый атом может колебаться относительно другого, значит, степеней свободы больше и энергия на каждую молекулу приходится большая. Из этих правил легко вычислить теплоемкость газа, и результаты хорошо согласуются с опытом.

Степени свободы электромагнитного поля в ящике — это все возможные стоячие волны. На каждую должна приходиться энергия  $kT$ : половина — на потенциальную энергию, половина — на кинетическую.

Сколько стоячих волн может образоваться в ящике? Чтобы возникла стоячая волна, от стенки до стенки должно уложиться целое число полуволн. Чем короче длина волны, тем больше возможностей выполнить это условие. Число возможных стоячих волн растет с уменьшением длины волны и, значит, с увеличением частоты. Если на каждую волну приходится одинаковая энергия, а число волн растет с частотой,



то должна была бы расти и интенсивность излучения. Но точными опытами было установлено, что интенсивность при больших частотах резко — по экспоненциальному закону — падает, это называется законом Вина.

Но главное — общее число стоячих волн всех частот бесконечно, они бы забрали на себя всю тепловую энергию стенок, сколько бы тепла мы к ним ни подводили. Это была бы действительно катастрофа — все предметы вокруг отдали бы тепло в бездонную бочку излучения.

Да, началу теории снова предшествовал парадокс, и в 1900 г. основоположник квантовой теории немецкий физик Макс Планк нашел единственную возможность объяснить его: частицы, излучающие волны с частотой  $\omega$ , могут изменять свою энергию только скачками, дискретными порциями  $\hbar\omega$ . Коэффициент пропорциональности  $\hbar$  вошел в науку как «посто-



янная Планка» — основная константа квантовой теории.

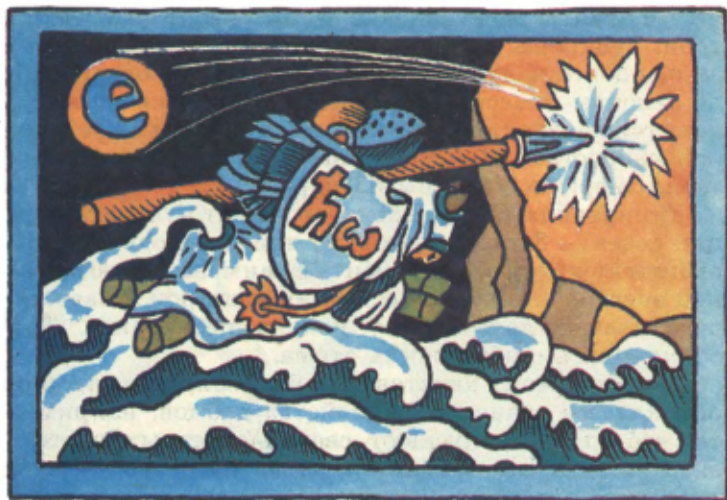
Излучатели с большой частотой имеют минимальную энергию. Чтобы их возбудить, нужно передать им энергию  $\hbar\omega$ , много большую, чем тепловая. Согласно статистической физике, вероятность излучателю приобрести энергию  $E = \hbar\omega$ , много большую, чем  $kT$ , резко падает с увеличением отношения  $E/kT$ , и в тепловом равновесии возбуждена только малая доля таких излучателей. Значит, и интенсивность испускаемого ими света мала — так объясняется закон Вина.

Планк получил формулу, которая описала результаты экспериментов по распределению интенсивности всех частот при разных температурах стенок. Для согласия с опытом нужно было только правильно подобрать константу  $\hbar$ . Численное значение этой величины:  $\hbar \cong 10^{-27}$  эрг. с. Понятно, почему скачкообразность излучателей не замечают в повседневной жизни. Порции энергии так малы, что изменение кажется непрерывным.

Что же такое свет? Известные всем вам опыты по интерференции и дифракции доказывают, что свет — это волна. Чтобы объяснить конечную скорость распространения света, Ньютон предположил, что светящееся тело испускает частицы — корпускулы, которые и передают свет. Эта теория не могла объяснить интерференции и дифракции и была забыта.

В 1905 г. Эйнштейн, объясняя явления фотоэффекта — вырывания электронов из атома при облучении, заключил, что волна не может дать такой концентрации энергии на одном электроне, чтобы вырвать его с орбиты. Свойства фотоэффекта полностью объясняются, если предположить, что свет — это набор частиц-фотонов, которые ударяются об электрон и выбрасывают его наружу.

Эйнштейн предположил, что энергия волны заданной частоты может изменяться только порциями  $\hbar\omega$ ,



так же как энергия излучателей, о которой говорил Планк. Одновременно с этим изменяется импульс волны. Порция импульса  $p$  связана с длиной волны  $\lambda$  соотношениями:  $p = \hbar\omega/c = 2\pi \hbar/\lambda$ . Электромагнитная волна ведет себя как газ частиц — фотонов с энергией  $\hbar\omega$  и импульсом  $\hbar\omega/c$ .

Дискретность распространилась на электромагнитные волны. Теория фотоэффекта отчасти подтвердила корпускулярную теорию Ньютона; так что же такое свет — частица или волна? Объяснить это тогда никто не смог. Возник новый парадокс.

**Правила квантования.** В 1913 г. Нильс Бор установил правила, настолько загадочные даже для самого их создателя, что он назвал их постулатами — недоказанными предположениями.

Бор сделал еще один шаг по той неведомой дороге, которой шли Планк и Эйнштейн, — он распространил дискретность на атом, утверждая, что допустимы

не все орбиты электронов, а только некоторые. Электрон, вращаясь вокруг ядра, движется с ускорением и, значит, излучает электромагнитные волны, ведь по законам классической электродинамики не излучает только заряд, движущийся по прямой с постоянной скоростью. Излучающий электрон, непрерывно теряя энергию, упал бы на ядро.

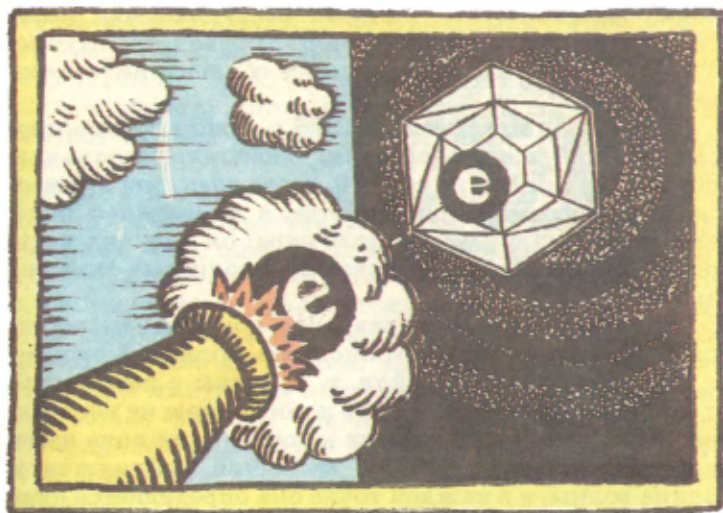
По правилам Бора, электрон может излучать порции света — фотоны — только при переходе с одной орбиты на другую. Есть орбита с наименьшей возможной энергией, и в этом состоянии электрон живет неограниченно долго — ему некуда переходить. Так объяснилась стабильность атома.

Смысл правил квантования был неясен, но теория описала все главнейшие свойства атомов, например то, что атомы испускают свет дискретных частот: энергия излучаемого фотона равна разности энергий на двух дискретных орбитах — верхней по энергии и нижней. Бор вычислил наблюдаемые частоты излучаемого атомом света, выразив их через заряд ядра, заряд и массу электрона, постоянную Планка.

**Догадка, которая подтвердилась.** Событие, которому суждено было объяснить смысл постулатов Бора, произошло в 1923 г. Но сначала оно лишь чувствительно задело большое место — проблему волн-частиц.

Французский физик Луи де Бройль предположил, что электроны на самом деле не частицы, а волны, вернее — и частицы, и волны... Частицы должны описываться волновым процессом с длиной волны  $\lambda$ , связанной с количеством движения  $p$ , как и длина волны фотонов, частиц света, который тоже неизвестно что, волна или частица.

На такую странную догадку, которая только запутывала и без того сложный вопрос, надо было бы просто махнуть рукой, но нашлись смелые люди, которые подтвердили ее опытом: через четыре года амери-



канские физики Клинтон Дэвиссон, Льюис Джермер и независимо от них англичанин Джордж Томсон открыли дифракцию электронов на кристаллах. Значит, электрон на самом деле волна!

Догадка оказалась гениальной. Опыт подтвердил не только предположение де Бройля, но и в точности его формулу для длины электронной волны. История повторилась в обратном порядке: свет сначала изучили как волну, потом как набор частиц, а электрон — наоборот.

**Рождение новой механики.** Догадок и необыкновенных, принципиально новых открытий накопилось уже достаточно: была установлена дискретность возможных значений ряда величин; найден один из основных масштабов природы — постоянная Планка, разграничивающая область явлений, описываемых классической физикой, и явления квантовой при-

роды; выяснено, что частицы выступают как носители и волновых, и корпускулярных свойств... Нужно было обобщать их, искать единое объяснение — строить теорию.

**Квантовая механика.** В 1926 г. Эрвин Шрёдингер, австрийский физик-теоретик, обобщил гениальную догадку де Бройля на случай, когда электрон движется не в свободном пространстве, а во внешнем поле, например в кулоновском поле ядра; он получил уравнение для функции, описывающей волновые свойства частиц.

Если написать это уравнение в свободном пространстве, функция будет описывать волновой процесс с длиной волны де Бройля, т. е. волны с постоянной длиной. Во внешнем же поле длина волны не постоянна, она изменяется от точки к точке. Если поле изменяется медленно, так же медленно изменяется и длина волны, и в каждой точке она определяется формулой де Бройля, только «импульс»  $p$  будет не постоянным, а изменяющимся от точки к точке  $p(r)$ .

Оказалось, что решение уравнения Шрёдингера для атома водорода получается в согласии с правилами квантования Бора не для всех энергий, а только для дискретных значений, совпадающих с теми, которые следовали из правил Бора. Стационарное — устойчивое — состояние электрона в атоме водорода — допустимая боровская орбита — на языке уравнения Шрёдингера означает, что получилась стоячая волна, а стоячая волна получается, когда в области движения электрона укладывается целое число волн де Бройля.

В этом и состоит смысл правил квантования: стоячие волны могут образоваться только при дискретных значениях энергии электрона, когда в области движения укладываются одна, две, три и так далее волн.

Поясним это на простом примере. Предположим, что частица движется между непроницаемыми стен-

ками, расположенными на расстоянии  $l$  друг от друга. У каждой из стенок волновая функция должна обращаться в нуль, т. е. переходить в волновую функцию снаружи, которая равна нулю (поскольку за стенки частица не выходит). Поэтому, чтобы получилось стационарное состояние  $n$ , на длине  $l$  должно уложиться целое число полуволн:  $2l/\lambda = n$ . Такая стоячая волна представляет собой суперпозицию двух бегущих волн, одна из которых бежит направо, другая — налево, как в струне. Средний импульс частицы, отвечающей такой стоячей волне, равен нулю, а квадрат импульса связан с длиной стоячей волны соотношением де Бройля. Длина волны де Бройля связана с импульсом частицы тем же соотношением:  $p = 2\pi h/\lambda = \pi h n/l$ . Найдем энергию:  $E = p^2/2m$ . Отсюда легко получить формулу:  $E = \pi^2 \hbar^2 n^2 / 2ml^2$ . Так для этого простого случая мы нашли уровни энергии.

**Квантование осциллятора.** Отвлечемся немного от истории и посмотрим, что получится, если применить квантовую механику к обобщенному осциллятору, о котором уже шла речь.

Чтобы найти возможные состояния осциллятора, нужно, так же как и в уже описанном случае, чтобы образовалась стоячая волна с одной, двумя, тремя и так далее полуволнами де Бройля. Но в отличие от задачи о движении частицы между стенками длина  $l$  области, где может находиться координата осциллятора, растет с его энергией.

Приведем результат решения уравнения Шрёдингера. Энергия осциллятора  $E_n = (n + 1/2) \hbar\omega$ . Она изменяется не непрерывно, как у классического осциллятора, а скачкообразно, порциями, равными  $\hbar\omega$ , что подтверждает правильность предположения Планка, которое положило начало квантовой теории.

Не менее важно и другое отличие от классического

осциллятора. В самом нижнем состоянии, когда  $n = 0$ , энергия не равна нулю, а равна  $\hbar\omega / 2$ . Конечно, совершенно ясно, что энергия не может равняться нулю; если бы одновременно были равны нулю и кинетическая, и потенциальная энергии, значит, были бы равны нулю и координата, и импульс. А это невозможно: сейчас мы познакомимся с соотношением неопределенности, согласно которому координата и импульс одновременно не могут иметь определенного значения!

Вот важное свойство квантового осциллятора, имеющее множество далеко идущих следствий: квантовый осциллятор в основном состоянии, в отличие от классического, не покоится. Ни кинетическая, ни потенциальная его энергии не равны нулю.

Оценим энергию основного состояния. Энергия осциллятора имеет вид:  $a\dot{q}^2/2 + \gamma q^2/2$ . Обобщенный импульс осциллятора — «масса» на «скорость» — равняется  $p = a\dot{q}$ . В основном состоянии в области движения осциллятора  $q$  укладывается половина волны де Бройля. При оценке для простоты будем отбрасывать численные множители.

Длина волны  $\lambda = \hbar/p \sim q$ . Итак,  $p = \hbar/q$ . Подставляя в выражение для энергии, найдем:  $(\hbar^2/2aq^2) + \gamma q^2/2$ . Наименьшая энергия получится, если приравнять кинетическую энергию к потенциальной. Вспомним, что частота осциллятора  $\omega = \sqrt{\gamma/a}$ .

Отсюда найдется амплитуда колебаний осциллятора в основном состоянии:  $q^2 \sim \hbar/a\omega$  и энергия основного состояния:  $E_0 \sim \hbar\omega$ . Так же мы могли бы оценить значения энергии возбужденного состояния, получился бы результат, напоминающий точное решение, только с неопределенным числовым множителем впереди.

Так качественное рассмотрение позволяет выяснить свойства решения и даже получить линейную зависимость энергии от номера возбуждения.



Одно из двух: координата или импульс. Необычные — мысленные — эксперименты проделывал Вернер Гейзенберг, размышляя в 1927 г. о понятиях координаты и импульса частицы. Он пришел к мысли, что невозможно одновременно точно измерить координату и импульс: чем точнее измеряешь координату электрона, тем менее определенным делается его импульс...

Чтобы измерить координату, нужно посмотреть в «микроскоп» на электрон, освещенный светом короткой волны. Координата электрона будет измерена с неопределенностью порядка длины волны использованного света. Но, взаимодействуя с волной, электрон получит отдачу: его импульс изменится на величину порядка импульса одного фотона, равного  $2\pi\hbar/\lambda$ . Чем меньше  $\lambda$ , тем лучше будет измерена координата, но тем более неопределенным станет импульс.

Итак, неопределенность координаты  $\Delta q \sim \lambda$ , неопределенность импульса  $\Delta p > 2\pi\hbar/\lambda$ . Умножая выражение для  $\Delta p$  на  $\lambda \sim \Delta q$ , получим:  $\Delta q \Delta p \sim 2\pi\hbar$ .

Это и есть соотношение неопределенностей Гейзенберга.

Попробуем измерить координату электрона другому — проделаем известный опыт, много раз проводившийся со светом. Пропустим пучок электронов через отверстие в экране так, чтобы он шел перпендикулярно плоскости экрана, а за отверстием поставим второй экран. На нем появится яркое пятно с размытыми краями — свет у краев отверстия загибается, это результат его волновой природы. Загибание света легко увидеть, закрыв лампочку линейкой, линейка покажется выщербленной в том месте, где проходит свет. Та же картина дифракции получится и у пучка электронов.

По другую сторону экрана по законам дифракции получится пучок волн всех направлений, лежащий

внутри некоего угла — угла дифракции. Отклонение электрона от прежнего направления после прохождения отверстия означает, что он получил импульс отдачи в поперечном направлении. Неопределенность поперечной координаты равна диаметру отверстия и связана с неопределенностью импульса опять соотношением Гейзенберга.

Проделав множество таких мысленных экспериментов с тем же результатом, нельзя не прийти к заключению, что мы имеем дело с принципиальным ограничением, которое природа накладывает на понятия координаты и импульса частицы. Этого ограничения не знала классическая физика, оно не вносит изменений в описание больших тел из-за малости  $h$ .

**Соотношение неопределенностей и принцип дополнителности.** Сама по себе координата и сам по себе импульс вполне определены, они становятся неопределенными, только если одновременно измерять их, они взаимно неопределены или дополнительные друг другу. Соотношение неопределенностей оказалось конкретным выражением общего принципа дополнителности, который сформулировал Нильс Бор в том же 1927 году.

Бор обнаружил, что кроме координаты и импульса частицы есть другие дополнительные понятия, например энергия и момент времени, когда произошло взаимодействие частицы с измеряющим устройством. Но, более того, идея дополнителности позволяет понять общую причину неопределенности некоторых понятий классической механики.

Квантовая природа микрообъектов дополнительна их классическому описанию. Что это значит?

Принципиальная неопределенность некоторых величин есть следствие применения классических понятий к описанию неклассических объектов. Но это неизбежно, ведь измерительные приборы должны да-

вать определенные показания, и в этом смысле они обязательно классичны. Не значит ли это, что наше описание объективных свойств микрообъектов неопределенно и двусмысленно? Нет, язык классической физики, на котором говорят наши средства наблюдения и на котором мы формулируем свои мысли, позволяет до конца исследовать квантовые свойства микрообъектов.

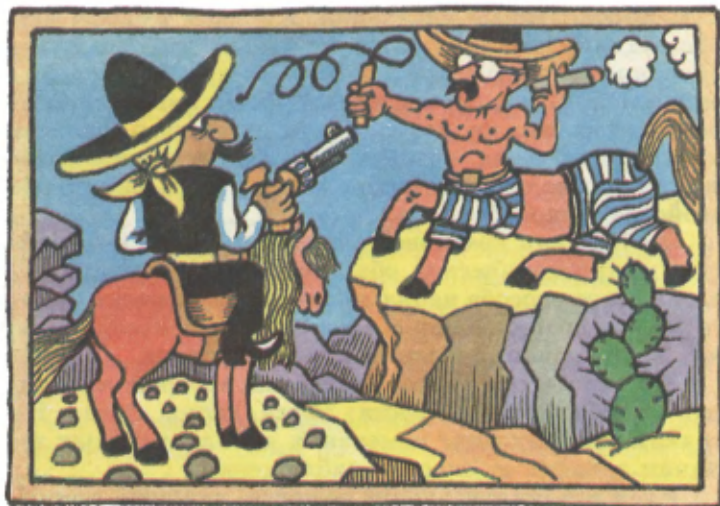
Особенность квантовой механики в том, что свойства микроскопических объектов нельзя изучать, отвлекаясь от способа наблюдения. В зависимости от него электрон проявляет себя либо как частица, либо как волна, либо как нечто промежуточное.

Конечно, у частиц есть свойства, которые не зависят от способа наблюдения: масса, заряд, спин... Но всякий раз результат измерения дополнительных величин зависит от способа наблюдения.

Идея дополнительности помогла, наконец, примирить представление об электроне как о частице и о волне. Сказочные мифические существа — кентавры, люди-кони — в одной ситуации воплощают человеческую мудрость и благожелательность, в другой проявляют животный буйный нрав и невожатность; одни из них воспитывали героев, другие — вредили им. Частица-волна электрон — то человек, то конь, то кентавр, в зависимости от ситуации, от вопросов, которые задает эксперимент.

Итак, сформулированы основные законы и принципы. Квантовая механика на основе принципа дополнительности осуществляет синтез ранее непримиримых понятий; она позволяет предсказать исход любого опыта, в котором проявляются как корпускулярные, так и волновые свойства частиц. Но главный вопрос оставался нерешенным: что такое волновая функция, главный инструмент теории?

**Физический смысл волновой функции.** Вернемся снова к нашему опыту. Поставим далеко за экраном



фотопластинку. Электрон, попав на нее, «засветит» зерно эмульсии, и его координата определится с точностью до размеров зерна. Пучок электронов после дифракции засветит круг. Если уменьшать интенсивность пучка так, чтобы падал, скажем, один электрон в минуту, дифракционная картина не изменится, надо только подольше подождать, пока она проявится. Значит, и одному электрону нужно приписать вероятность попасть в то или иное место фотопластинки. . .

Анализ подобных опытов позволил Максиму Борну в 1926 г. предположить, что квадрат волновой функции определяет вероятность того или иного значения координаты или импульса электрона в зависимости от типа поставленного опыта.

Что помогло прийти к такому заключению? Вспомним, что теория волновых явлений света — интерференции и дифракции — была разработана задолго до уравнений Максвелла, до понимания элек-

ромагнитной природы света. Предполагалось только, что источник света испускает волны неизвестной природы, а интенсивность света пропорциональна квадрату той величины, которая колеблется. В современном представлении в световой волне колеблются во времени и пространстве электрические и магнитные поля и интенсивность света пропорциональна их квадрату. Но почти все волновые проявления объясняются независимо от природы света.

Было естественно считать, что и для волн, связанных с частицами, интенсивность — в нашем случае вероятность — пропорциональна квадрату волновой функции.

Сначала предполагали, что волновым свойствам частицы соответствует реальное физическое поле, подобное электромагнитному в световой волне. Но тогда уже один электрон давал бы в одном акте всю дифракционную картину, а он чернит только одно зерно... Значит, волновая функция частицы не физическое поле, не физическая волна, это «волна информации». Она представляет собой запись потенциальных возможностей исхода того или иного наблюдения.

Волновая функция — максимально полное, возможное описание состояния частицы. Она заменяет классическое состояние, которое задается координатами и скоростями.

Странные и удивительные свойства волновой функции казались Эйнштейну физически недопустимыми. Спор Эйнштейна с Бором продолжался много лет и привел к более глубокому пониманию квантовой механики. Действительно, если волновая функция — описание вероятностей, значит, опыт, проделанный в одном месте, может скачком изменять результаты измерений в другом месте... Для физического поля это недопустимо. Но если принять, что волновая функция — волна информации,

все становится на свои места. Скачкообразное изменение вероятности вызвано уточнением, новой информацией. Мы задаем вопрос: какова вероятность получить двойку по физике? Прибавив к этому уточнение, определенное условие, например: «не заглядывая дома в учебник», — мы получим скачкообразное изменение вероятности, она может подскочить до единицы. Обратное условие: «полностью поняв и выучив урок» — снова скачком сведет вероятность к нулю.

Представим себе, что две частицы с суммарным импульсом, равным нулю, разлетелись и нам нужно найти импульс одной из них — в Москве, другой — на Северном полюсе. Вероятность найти частицу с определенным импульсом изменится скачком, если мы измерим импульс первой частицы и будем искать импульс другой при условии, что московский нам известен. Вероятность зависит от того, какой вопрос мы поставим, отберем ли мы любые исходы северных опытов или только те, при которых московский импульс имеет заданную величину. Ничего странного и необычного в этом нет.

**Нарушается ли причинность?** Удивительные успехи небесной механики в XVII—XVIII вв. внушили глубокую веру в возможность однозначных предсказаний. Гордясь могуществом своей науки, французский астроном, математик, физик Пьер Лаплас сказал: «Дайте мне координаты и скорости всех частиц, и я предскажу будущее Вселенной!»

Но вот мы узнали, что одновременно точно задать импульсы и координаты частиц невозможно! Согласно квантовой механике, можно указать только вероятность того или иного значения координат и импульсов.

Наука уже сталкивалась с вероятностными предсказаниями. Классическая статистическая физика может ответить на вопрос: какова вероятность найти

частицу нагретого газа с такой-то энергией? Но эта вероятность рождена сложностью системы, неточностью определения начального состояния — за нею стоит строгая однозначность механических законов.

Главное открытие квантовой механики — вероятностный характер законов Вселенной. Раз на некоторые вопросы нельзя однозначно ответить, значит, на взгляд классической физики, нарушена причинность!

Да, мы не можем задать координаты и импульсы частиц, можем только задать в начальный момент волновую функцию и однозначно найти ее в любой более поздний момент. Мы можем с такой же гордостью воскликнуть: «Дайте мне волновую функцию всех частиц, и я предскажу будущее!»

Итак, в более точном смысле причинность сохраняется: из максимально полно определенного в квантовомеханическом смысле начального состояния однозначно следует единственно возможное конечное состояние.

Квантовая механика — внутренне непротиворечивая теория, полностью согласующаяся с опытом для своего круга явлений,

## Теория относительности

Начавшись с анализа такого простого и привычного для нас понятия одновременности, перевернув все представления о времени и пространстве, теория относительности привела к появлению новой механики, без которой нельзя построить ускорители заряженных частиц; к новой теории тяготения, подтвержденной опытом и предсказавшей новые объекты — «черные дыры», к созданию современной космологии, установившей расширение Вселенной.

**Все ли на свете относительно?** Рассказывая о симметриях, мы уже упоминали о замечательном свойстве механических движений: они протекают одинаково в равномерно движущейся системе и в неподвижной, в космическом корабле и на поверхности Земли. В этом и заключается принцип относительности, который был установлен еще Галилеем. С помощью законов механики нельзя установить, движется система или покоится. Не глядя в окно, движение поезда можно ощутить только при изменении скорости, торможении или ускорении. Иногда, выглянув в окно, мы видим, что поезд тихо поехал в обратном направлении; скоро, однако, становится ясно, что на самом деле поехал вперед поезд, стоявший на соседнем пути.

Еще в прошлом веке физики задумались над тем, справедлив ли принцип относительности, скажем, для света или для электричества.

В 1865 г. появились уравнения Джеймса Клерка Максвелла, объединившие электричество и магнетизм, доказавшие существование электромагнитных волн. Свет — тоже электромагнитные волны, как и радиоволны, только с гораздо меньшей длиной волны. Из уравнений Максвелла вытекало, что свет должен распространяться с одинаковой скоростью во всех равномерно движущихся системах координат.

**Удивительное свойство света.** Но, может быть, равенство скорости распространения света относится только к системам координат, движущимся с малыми скоростями?

В 1887 г. американский физик Альберт Майкельсон измерил с колоссальной точностью скорость света вдоль и поперек движения Земли. Опыт Майкельсона доказал, что скорость света не зависит от скорости источника и одинакова в неподвижной и движущейся системе координат. Принцип относительности оказался справедливым для света.



На первый взгляд это очень странно. В классической механике скорости движений складываются. Если человек идет по вагонам по ходу поезда со скоростью пять километров в час, а сам поезд движется со скоростью пятьдесят километров в час, то скорость прогуливающегося пассажира относительно Земли будет пятьдесят пять километров в час. То же самое, согласно классическому закону сложения скоростей, должно происходить и со светом. Но на деле скорость света всегда одна и та же.

**Лоренц, Пуанкаре, Эйнштейн.** Хендрик Лоренц — вам уже знакомо имя замечательного нидерландского физика — в 1904 г. пришел к выводу, что принцип относительности существует и для электродинамики, но только к движущимся системам координат нельзя применять классический закон сложения скоростей. Он вывел новые законы связи координат и скоростей в движущихся системах, они называются преобразованиями Лоренца. Как мы уже упоминали, выяснилось важное обстоятельство: скорость тел не может превысить скорости света. Люди, с упоением рассказывающие о летающих тарелках, передвигающихся с необычными скоростями, не знают этого или знали когда-то, но забыли.

Кроме того, Лоренц обнаружил, что при движении электрические взаимодействия между атомами изменяются и тела должны сжиматься в направлении движения тем больше, чем больше скорость. И это явление назвали именем его первооткрывателя: «лоренцово сокращение». Одновременно изменяются и ритмы всех процессов.

Изменения масштабов времени и длин подчиняются важному закону симметрии. Ее математическую структуру выяснил великий французский математик Анри Пуанкаре. В работе, появившейся в 1905 г., он показал, что принцип относительности означает симметрию законов электродинамики и механики

относительно поворотов в четырехмерном пространстве, где четвертая координата — время, помноженное на скорость света.

Но почему ритмы процессов изменяются всегда одинаково, универсально, не зависят от устройства тел, а только от скорости их движения? И почему они всегда изменяются как раз так, что никакой электродинамический процесс не позволяет обнаружить движение с постоянной скоростью? Это выглядело, как фокус.

Лоренц и Пуанкаре, вслед за Ньютоном, считали время и пространство абсолютными, одинаковыми для движущихся и для неподвижных тел. Но если отказаться от этого представления, показать относительность понятий пространства и времени, можно объяснить универсальность преобразований Лоренца.

С этого и начинается работа Альберта Эйнштейна со скромным названием «К электродинамике движущихся тел», которая появилась в 1905 г., одновременно с работой Пуанкаре.

Одновременно ли одновременное? Прежде всего Эйнштейн предложил экспериментальный способ определения одновременности. Необходимость этого подчеркивал Пуанкаре еще в своих ранних популярных статьях. Раньше это понятие основывалось на интуиции, повседневном опыте.

Установить одновременность событий в разных местах можно двумя способами. Сверить множество одинаковых часов, перенести их в разные места и по ним проверять одновременность. Но как будут идти часы на дне океана или в космической ракете? Гораздо надежнее сверять часы с помощью радиоили световых сигналов — эксперимент точно показал, что скорость света не зависит от скорости источника, электромагнитные волны распространяются с одинаковой скоростью по всем направлениям.

Немного осовременим пример, приведенный Эйнштейном. Вместо его движущейся системы координат представим себе космический корабль в полете. Космонавт сверяет часы на носу корабля и на корме, добиваясь, чтобы их стрелки показывали одинаковое время, в тот момент, когда на нос и на корму придут вспышки света от источника, расположенного точно посередине.

Сразу же ясно, что одновременность — понятие относительное. Посмотрим со стороны, с Земли. С нашей точки зрения, после вспышки корма двинулась навстречу свету, а нос от него удалялся. В системе координат Земли скорость света та же, что и на корабле, значит, вспышка придет на корму раньше, чем на нос, и мы радируем космонавту, что часы, с нашей точки зрения, сверены неправильно.

**С причинностью всё в порядке.** Смешное существо по имени Труляля, придуманное Льюисом Кэрроллом, все время напевает: «Задом-наперед, совсем наоборот!» Так вот, если бы космический корабль двигался задом-наперед, все было бы совсем наоборот, свет с земной точки зрения раньше пришел бы на нос! Так что относительны и понятия «раньше» и «позже». А эти понятия теснейшим образом связаны с причинностью... Неужели она нарушена?

Нет, все в порядке, и в этой теории, так же как и в квантовой, причинность строго соблюдается. Принцип причинности требует, чтобы причина предшествовала следствию. Причина вспышек на носу и на корме — вспышка посередине, и при любой скорости, в любых обстоятельствах она происходит раньше.

Так кому же верить — космонавту или придирчивому землянину? Будем справедливы, и тому, и другому. С точки зрения космонавта, движется Земля, и, если бы сверяли часы на Земле, он мог бы

сделать точно такое же замечание своим товарищам, оставшимся дома.

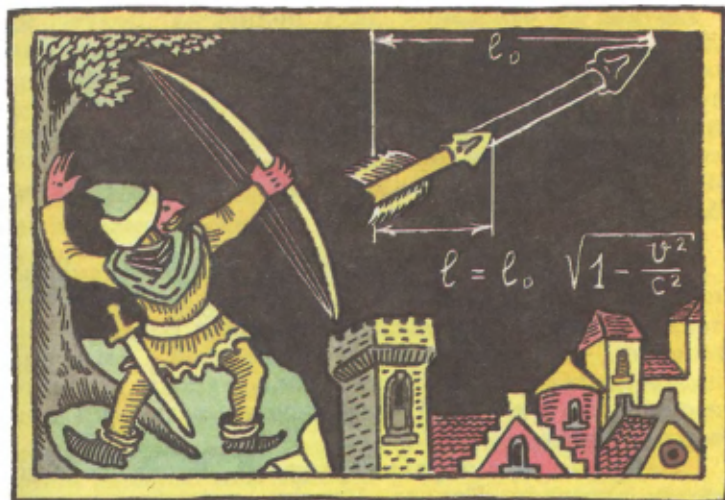
**Что еще относительно?** Из заключения об относительности одновременности, с такой ясностью вытекающего из способа проверки, лавиной хлынули всевозможные следствия.

Интервал времени между двумя событиями тоже оказался относительным! Действительно, представим себе, что в лаборатории, расположенной в космическом корабле, измеряется интервал времени между вспышкой лампочки на потолке и регистрацией этой вспышки на полу.

Если высота корабля  $l_0$ , мы уверенно скажем, что интервал времени  $\tau_0$  равен высоте, деленной на скорость света  $c$ . Пока свет будет идти с потолка на пол, с точки зрения землянина, фотоэлемент на полу вместе с кораблем передвинется на расстояние  $v\tau$ , где  $v$  — скорость корабля, а  $\tau$  — время между теми же событиями, с земной точки зрения. Значит, свету нужно идти не по отвесной прямой, не по катету, а по гипотенузе прямоугольного треугольника, длина которой  $l$ . Катетами будут высота корабля  $l_0$  и расстояние по горизонтали, пройденное фотоэлементом вместе с кораблем. Так как гипотенуза больше катета, а скорость света для всех одинакова, то земное время  $\tau$  будет больше чем  $\tau_0$ .

Итак, с точки зрения неподвижного наблюдателя интервал времени между теми же событиями удлиняется. Те, кто в ладах с теоремой Пифагора, легко могут узнать на сколько. По теореме Пифагора,  $l^2 = l_0^2 + v^2\tau^2$ . Раз скорость света одинакова,  $l = c\tau$  и  $l_0 = c\tau_0$ . Отсюда совсем просто получить:  $\tau = \tau_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ . Отношение интегралов неограниченно растет при скорости, приближающейся к скорости света.

Замедление ритма движущихся тел относится



ко всем явлениям природы — электрическим, механическим, гравитационным, биологическим... Если бы не это, мы не смогли бы увидеть быстрые пи-мезоны, образованные в верхних слоях атмосферы космическими лучами. Покоящийся пи-мезон за две стомиллионные доли секунды превращается в мюон и нейтрино. Быстрый пи-мезон мог бы пролететь всего шесть метров, если бы время его жизни не удлинялось по формуле, которую мы получили.

Если относительна одновременность, должна быть относительной и длина — ведь, чтобы измерить длину движущегося стержня, надо сделать одновременную отметку положения правого и левого конца на неподвижной измерительной линейке! Не будем выводить формулу лоренцова сокращения, вот ее результат:  $l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$ . Здесь  $l_0$  — длина неподвижного стержня, или истинная длина, а  $l$  — длина движущегося стержня.

Итак, на основании двух полностью подтвержденных экспериментом положений — из принципа относительности и постоянства скорости света — теория относительности вывела формулы для изменения длин движущихся тел и ритмов всех процессов в зависимости от скорости. Законы механики изменились для тел, движущихся со скоростями, близкими к скорости света.

**Теория тяготения.** Еще более глубокий анализ понятия пространства-времени, новые законы тяготения, неожиданная связь тяготения и геометрии и, наконец, новое понимание Вселенной, блестяще подтвердившееся наблюдениями, — таковы главные итоги развития общей теории относительности или теории тяготения.

**Инертная масса равна тяжелой.** В сказке чешского писателя Карела Чапека ласточка-путешественница, побывавшая в Америке, описывает своим подружкам тамошние небоскребы: «Если бы воробей на крыше гнездо себе свил и из того гнезда выпало бы яичко, пока оно падало бы, из него вылупился бы воробышек, и вырос бы, и женился бы, и народил бы кучу детей, и состарился бы, и умер бы в преклонном возрасте, так что на тротуар вместо воробьиного яйца упал бы старый мертвый воробей». Воспользуемся живописным примером — представим себе, что так же долго, как воробышек, с вершины небоскреба падает лифт, а чтобы это не выглядело слишком мрачно, оговоримся, что падение кончится вполне благополучно, посадка будет мягкой.

Если человек внутри такого лифта уронит книжку, она, падая с ускорением, никогда не упадет на пол, потому что пол движется с таким же ускорением и все время «убегает» от книжки. Она повиснет в воздухе. В свободно падающем лифте механи-

ческие и все другие процессы выглядят так же, как в неподвижном в отсутствие силы тяжести. Невесомость возникает оттого, что сила инерции, пропорциональная массе, точно уравнивает силу тяжести, также пропорциональную массе.

Торопясь в кондитерскую, мы мечтаем о покупке некой массы конфет. Продавец сыплет конфеты на тарелку весов, а на другую тарелку ставит гирю, — что это, нам продают не массу, а вес! Но не обижайтесь на продавца — вес строго пропорционален массе, масса инертная равна массе весомой. Поэтому-то все тела в поле тяжести движутся с одинаковым ускорением.

Пропорциональна массе только сила тяжести. В электрическом поле разные массы при том же заряде приобретают разное ускорение, электрон движется быстрее, чем протон.

Насколько точно соблюдается равенство тяжелой и инертной массы? Может быть, все-таки нужно потребовать, чтобы конфеты продавали как массу, а не как вес? В 1889 г. венгерский физик Роланд фон Этвёш показал, что отклонение от равенства не превышает одной стомиллионной. Советский физик В. Б. Брагинский довел точность до  $10^{-12}$ .

Но почему же существует такая универсальная и точнейшая связь между массой и силой тяжести для всех тел, независимо от их устройства? Значит, между этими явлениями должна быть внутренняя связь. Тяготение и инерция должны быть эквивалентными явлениями. Это утверждение, вслед за формулировкой парадокса, было отправным пунктом для Эйнштейна при создании теории тяготения.

**Обобщение принципа относительности.** Принцип относительности утверждал, что во всех лабораториях, движущихся равномерно друг относительно





друга, законы природы одинаковы. Более того, теория относительности позволяет записать законы природы в таком виде, что равноценность всех равномерно движущихся систем отсчета сразу видна.

А если система движется с ускорением? Каковы будут законы природы в ящике, который тянут за трос с постоянной силой, или на вращающейся площадке? Уравнения механики немного усложняются: к силам, действующим на тела, добавится сила инерции. Для тела, движущегося с постоянным ускорением, сила инерции есть произведение массы на ускорение. Но добавление к уравнениям придется сделать и изучая движение тел на поверхности Земли — это будет произведение массы на ускорение силы тяжести.

Эйнштейн задался целью получить уравнения, в которых была бы видна равнозначность не только всех равномерно движущихся систем, но и всех возможных систем — и ускоренных, и вращающихся... Более того, его уравнения сохраняют свой вид и тогда, когда в любой точке пространства и времени системы движутся с разными ускорениями. Что это значит?

**Геометрия на вращающемся диске.** Оказалось, что задача, которую поставил перед собой Эйнштейн, тесно связана с отклонениями геометрии от обычной, евклидовой, о которых мы уже не раз упоминали.

Поставим лабораторию в центре вращающегося диска. Тот, кто достаточно освоится внутри нее, обнаружит, что на поверхности диска что-то неладно с геометрией. И происходит это не потому что у наблюдателя сильно кружится голова: наружные части диска движутся с большей скоростью, чем внутренние, и, следовательно, испытывают большее лоренцово сокращение! Поэтому отношение длины большой

окружности к длине малой окружности с центрами в центре диска не совпадает с отношением радиусов. Ведь скорость вращения перпендикулярна радиусу, и радиальные длины лоренцова сокращения не испытывают.

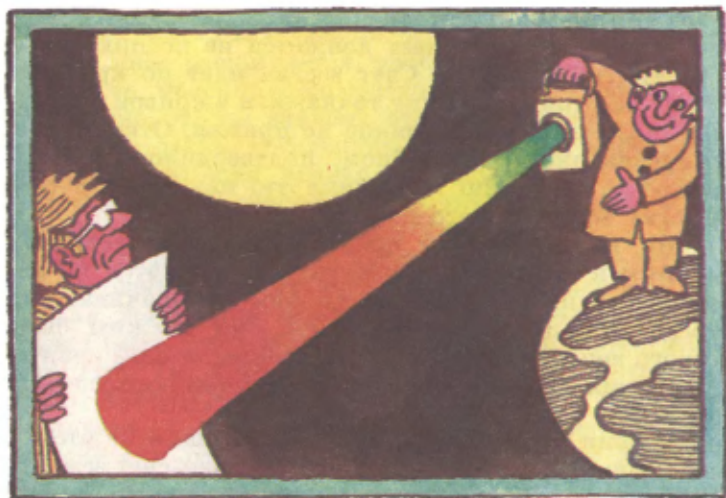
В неподвижном диске отношение длин окружностей равняется отношению радиусов, в согласии с правилами геометрии. Отклонение от этих правил на вращающемся диске в разных точках разное: вблизи центра, где скорости малы, мало и отклонение, а на краях, где скорость приближается к скорости света, — громадное. То же самое произойдет и со временем — часы на краях диска будут больше отставать от неподвижных.

Наблюдатель на диске вправе считать, что он неподвижен и на его систему просто действуют силы тяготения, равные силам инерции, которые добавляются во вращающейся системе. Ведь сила тяготения неотличима от сил инерции. Он будет считать, что нарушение обычной геометрии вызывается силами тяготения.

Значит, обобщение принципа относительности на ускоренные системы невозможно без отказа от евклидовой геометрии.

**Уравнения Эйнштейна.** Геометрические свойства и сила инерции — или сила тяжести — оказываются теснейшим образом скрепленными. Уравнения Эйнштейна невозможно понять, не зная разделов математики, описывающих системы с геометрическими свойствами, изменяющимися от точки к точке. Можно лишь постараться понять структуру этих уравнений.

По одну сторону равенства пишется величина, характеризующая отклонения геометрических свойств пространства от евклидовой геометрии в данной точке четырехмерного пространства-времени. По другую — величина, характеризующая плотность



материи, умноженная на постоянную всемирного тяготения.

Из уравнений Эйнштейна для малых масс и скоростей получается уравнение тяготения Ньютона, а для больших возникают поразительные изменения. Изменения геометрии вблизи звезды зависят от отношения массы к радиусу. Вблизи Солнца, согласно теории, возникают малые поправки, но возле нейтронной звезды, радиус которой во много раз меньше радиуса Солнца, это уже не поправки, а значительное искажение геометрии.

Первая проверка теории была сделана в 1919 г. экспедицией Эддингтона во время полного солнечного затмения. Оказалось, что лучи света далеких звезд, проходя мимо Солнца, отклоняются. Теория тяготения объясняет это двумя причинами. Во-первых, сгусток света, как и всякая энергия, имеет массу, а инертная масса обязательно весома —

это дает половину отклонения. Вблизи тяжелых масс геометрия кривая и свет движется не по прямой — это вторая половина. Свет всегда идет по кратчайшему расстоянию между точками, а в кривой геометрии кратчайшее расстояние не прямая. Отклонение, предсказанное Эйнштейном, подтвердилось наблюдениями. Весь мир воспринял это как пример торжества человеческого разума!

Но не только это предсказание подтвердилось опытом и наблюдением. Меркурий движется по эллипсу, оси которого медленно поворачиваются, тогда как, по теории Ньютона, они должны быть строго неподвижны. Скорость вращения осей орбиты Меркурия совпала с тем, что дает теория относительности.

Теория предсказала, что свет, идущий от атомов на Солнце, имеет меньшую частоту, чем свет земного атома,— и опыт показал, что спектральные линии смещаются в красную сторону спектра, это называется красным смещением.

**Космология Эйнштейна — Фридмана.** Теория тяготения была завершена в 1916 г., а уже в 1917 г. Эйнштейн сделал неслыханный по смелости шаг — он применил теорию тяготения к миру в целом, ко всей Вселенной.

Вещество во Вселенной распределено неравномерно, существуют планеты, звезды, звездные скопления... Эйнштейн мысленно заменил неравномерную плотность на среднюю равномерную, как делается при рассмотрении газа. Эйнштейну хотелось получить Вселенную, геометрия которой не зависит от времени, но ему не удалось найти такого решения.

Через несколько лет замечательный советский ученый Александр Александрович Фридман, исследовав возможные решения уравнений Эйнштейна,

пришел к необычным заключениям: Вселенная не может быть статической, не зависящей от времени, она либо расширяется, либо сжимается. Средняя плотность материи недостаточно хорошо известна, но именно от нее зависит судьба Вселенной: если плотность мала, Вселенная будет неограниченно расширяться, если велика — расширение сменится сжатием и мир сожмется в точку. Эйнштейн полностью согласился с выводом Фридмана.

Так возникла космология Эйнштейна — Фридмана, современная наука о развитии Вселенной.

Как же можно проверить такие предсказания? Может быть, это просто-напросто красивая выдумка, игра ума? Но вот в 1929 г. американский астроном Эдвин Хаббл установил, что туманности — звездные скопления — разбегаются, и бег их тем быстрее, чем дальше они от точки наблюдения. Так и должно быть в расширяющейся Вселенной.

Зная скорость разбегания туманностей, можно, двигаясь назад по времени, сосчитать, когда родилась Вселенная. Возвращаясь к началу ее жизни, мы увидим, что когда-то она была сверхплотной и сверхгорячей, и, наконец, мы придем к моменту, когда плотность Вселенной была такой, при которой законы взаимодействия материи нам не известны. Дальше, вернее — «раньше», заглянуть нельзя. Сначала время жизни Вселенной оценили в несколько миллиардов лет. Современные, более точные расчеты увеличили эту цифру до двадцати миллиардов.

Начало расширения Вселенной называется большим взрывом. Ни природы, ни причин большого взрыва мы не знаем, но хорошо известно, что он был и даже, как видите, когда он был. Кроме разбегания туманностей большой взрыв подтверждается и другими расчетами и наблюдениями. Так, была рассчитана относительная распространенность водорода,

гелия и квантов во Вселенной — ее обусловило рождение из праматерии нуклонов и ядер. Но самое убедительное доказательство существования большого взрыва — открытие излучения, оставшегося с тех пор во Вселенной.

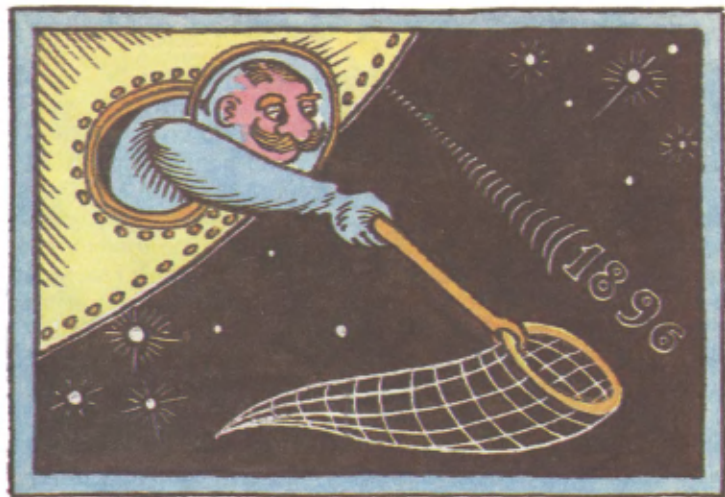
**Реликтовое излучение.** Герой рассказов польского фантаста Лема, знаменитый звездодоходец, капитан дальнего галактического плавания, член Общества по опеке над малыми планетами Йон Тихий записал в своем бортижурнале во время путешествия на планету Энтеропию: «В два часа поймал радиосигнал, посланный с Земли Поповым в 1896 г. Отдалился от Земли уже порядочно». А нельзя ли поймать то, что осталось от необычайного потрясения вселенского масштаба — большого взрыва?

В 50-х гг. было предсказано, что излучение тех времен должно существовать и сейчас. Его назвали реликтовым от латинского слова *relictum* — *остаток*, то, что сохранилось от далекого прошлого.

Когда-то, двадцать миллиардов лет назад, в сверхплотной и горячей Вселенной энергия фотонов должна была быть порядка тепловой энергии — излучение имело высокую температуру. Прошло около десятка лет после предсказания, и в 1965 г. произошло событие, которое далеко превзошло самые смелые мечты фантастов, — реликтовое излучение было открыто! Это было истинным чудом, совершенным могучим человеческим разумом.

Электромагнитные волны из-за расширения Вселенной успели остыть до температуры 2,7 градуса Кельвина; излучение можно наблюдать на волнах от нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Исследуя реликтовое излучение, можно увидеть Вселенную такой, какой она была на заре своей жизни, двадцать миллиардов лет назад.

Еще одно важнейшее следствие: с открытием ре-



ликтового излучения во Вселенной появилась выделенная система координат, система, в которой кванты излучения распределены по скоростям симметрично, как частицы газа в неподвижном ящике. И это означает, что существует абсолютная скорость — скорость относительно такой выделенной системы координат.

Но что же — ведь главное предположение теории относительности состоит в том, что такой системы нет, неужели теория опровергнута? Нет, теория несколько не стала хуже — плотность и энергия квантов реликтового излучения так малы, что практически не оказывают влияния на движение частиц и не изменяют следствий теории относительности.

Теория относительности — внутренне согласованная теория, и ее следствия точно и убедительно подтверждаются экспериментом.

## Квантовая теория поля

Применение двух замечательных теорий — квантовой теории и теории относительности — друг к другу и к другим областям физики привело к удивительным событиям, к взрыву новых открытий, к созданию множества новых направлений науки. Из квантовой механики и статистической физики родилась теория твердого тела и подарила человечеству такое, например, изобретение, как транзисторы, без которых немыслима высокотехническая цивилизация. Когда теория относительности была применена к квантовым объектам, возникла релятивистская квантовая механика и, в свою очередь, примененная к непрерывным объектам, вроде жидкостей или электромагнитного поля, привела к созданию квантовой теории поля. . . Все новые области нелегко даже перечислить, это и квантовая электродинамика, и ядерная физика, и элементарные частицы, и астрофизика...

**Квантовая механика при больших скоростях.** Когда квантовая механика была обобщена на частицы со скоростями, сравнимыми со скоростью света, т. е. когда две теории как бы подсоединились друг к другу, реальность засияла новыми красками, обогатилась открытиями новых частиц, удивительными свойствами физических полей.

**Частицы и античастицы.** В конце 20-х гг. Поль Дирак построил релятивистскую теорию движения электрона. Это был первый шаг к объединению теории относительности и квантовой теории. И уже этот первый шаг принес замечательные результаты.

Из уравнения Дирака автоматически получался правильный магнитный момент электрона, поправки к законам движения электронов в тяжелых атомах. . . Но самое важное — Дирак доказал, что должен суще-





ствовать антиэлектрон — положительно заряженный позитрон. Позитрон — близнец электрона, у них одинаковая масса, спин, наконец, заряды — противоположные по знаку — одинаковы по величине.

Уравнение Дирака описывает и частицу, и античастицу; оно предсказывает существование античастиц не только для электронов, но и для любой частицы со спином  $1/2$ : существуют антипротон и антинейтрон. Напомним, что спин — это угловой момент, измеренный в единицах  $\hbar$ . Частицы с целым спином описываются другим уравнением — Клейна — Гордона — Фока, но и для них у каждой частицы есть античастица.

В 1932 г. американский физик Карл Андерсон экспериментально открыл позитрон в космических лучах. Все элементарные частицы, кроме абсолютно нейтральных, таких, как фотон, нейтральный пи-мезон, имеют античастицы. Когда сталкиваются

медленные электрон и позитрон, происходит их аннигиляция, они превращаются в кванты. Это явление тоже было предсказано Полем Дираком и экспериментально подтверждено в 1933 г. Фредериком Жолио-Кюри и Жаном Тибо при бомбардировке платины позитронами. Когда происходит аннигиляция протона и антипротона, появляется некоторое количество мезонов или фотонов.

Мы уже говорили о том, что из античастиц можно составить антиатом, из антиатома — антивещество... В июне 1908 г. люди, жившие близ реки Подкаменная Тунгуска, были свидетелями яркой вспышки и взрыва в небе, ударная волна взрыва опустошила площадь в две тысячи квадратных километров. Фантастам эта загадка долго не давала покоя — а что если это был космический корабль пришельцев, состоящий из антивещества?

Астрофизики имеют серьезные основания считать, что во Вселенной нет антимиров. И эти основания им дает теоретически предсказанное и экспериментально открытое явление аннигиляции частиц и античастиц, она непрерывно происходила бы на границах обычного мира и антимира. Возникающие при аннигиляции кванты с энергией 0,5 МэВ заполнили бы Вселенную, но таких квантов нет. Что же касается Тунгусского метеорита, ученые предполагают, что при входе в плотные слои атмосферы взорвалась небольшая комета, и этому предположению есть доказательства. Не огорчайтесь, что удивительных и загадочных антимиров не существует — чудес в природе достаточно!

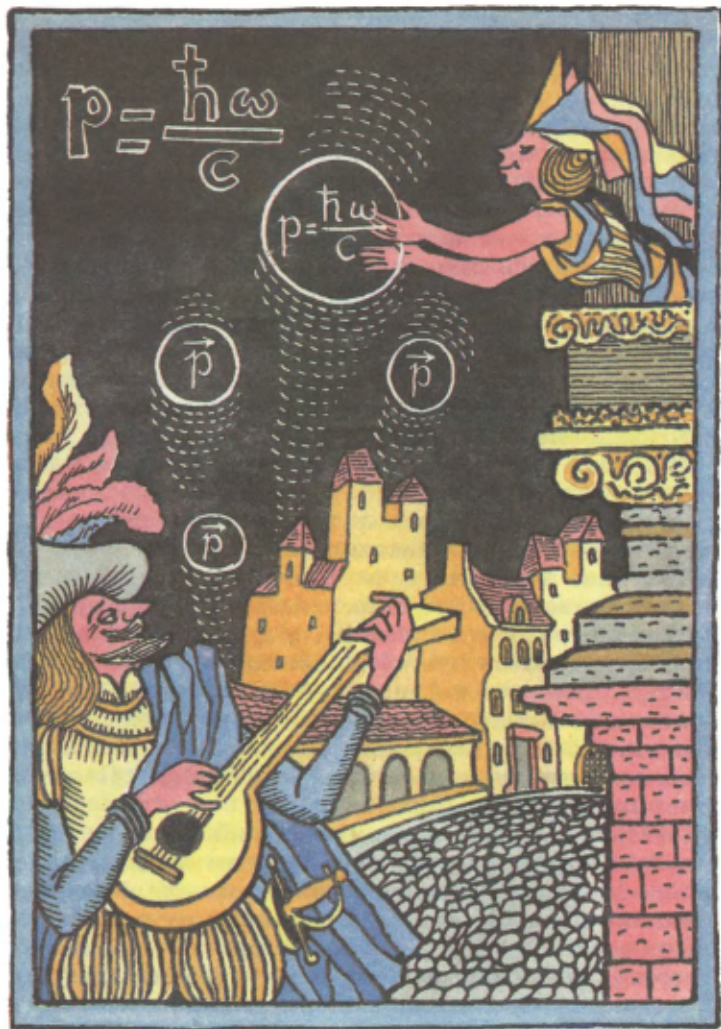
Еще один скачок — квантование поля. Мы уже знаем об удивительном следствии квантования осциллятора: когда энергия его минимальна, т. е. когда классический осциллятор находится в положении равновесия, квантовый совершает «нулевые» колебания. Кинетическая и потенциальная энергия этих колебаний порядка  $\hbar\omega$ . Среднее значение коор-

динаты осциллятора равно нулю, но среднее значение квадрата координаты отлично от нуля. Энергия его изменяется порциями:  $E = (n + 1/2)\hbar\omega$ . Энергия при  $n = 0$  (нулевая энергия) равна  $\hbar\omega/2$ .

Если рассматривать звуковые колебания твердого тела как набор квантовых осцилляторов, получится, что при температуре, равной абсолютному нулю, атомы твердого тела не неподвижны — они совершают нулевые колебания, и эти колебания действительно наблюдаются при рассеянии света на охлажденном твердом теле. Но и электромагнитные волны в пустоте можно считать набором осцилляторов, и, значит, в вакууме, где нет ни частиц, ни квантов, должны происходить нулевые колебания электромагнитного поля. Об этом очень важном и сложном явлении мы и поговорим.

Сначала попробуем разобраться в том, что такое квант света — фотон. Этот термин, как и некоторые другие, много раз встречался на страницах этой книги без объяснения. Но согласитесь, что сейчас уже вы, хотя и смутно, представляете себе, что такое «волновой процесс, связанный с частицей», или «квантовый осциллятор», и для ясного понимания слова «квант» нужно только еще одно небольшое усилие. Человек, не знающий английского языка, конечно, не понимает слова gain, которое слышит от окружающих, но, несколько раз изрядно промокнув, сообразит, что оно связано с плохой погодой. Понимание приходит с опытом,

Итак, сделаем опыт, мысленный, конечно. Представим себе, что между параллельными металлическими экранами, перпендикулярно им, образовалась стоячая волна. Если между экранами укладывается целое число полуволн, возникает стоячая волна, как в струне. Когда дергаешь струну, по ней бегут волны, отражаются от места закрепления, и устанавливается стоячая волна или несколько стоячих волн разной



длины. Аналогично этому можно возбудить между экранами стоячую волну, напряженность электрического поля в ней будет периодически колебаться — перед нами снова осциллятор. Нужно только выбрать такую обобщенную координату, чтобы энергия имела такой же вид, как у осциллятора. В случае электромагнитной волны обобщенной координатой можно считать напряженность электрического поля в какой-либо точке. А что же будет импульсом? Это должна быть величина, пропорциональная скорости изменения электрического поля. Именно такая величина — магнитное поле. Итак, наша стоячая волна — осциллятор, к ней можно применить уже известные нам результаты квантования осциллятора.

Самая длинная стоячая волна получится, когда между экранами поместится половина длины волны. Если расстояние между экранами  $l$ , а длина волны  $\lambda$ , то  $l = \lambda/2$ . Частота волны  $\omega = 2\pi c/\lambda$ , связана с возможными значениями энергии волны соотношением  $E_n = (n + 1/2)h\omega$ . В наименьшем состоянии с  $n=0$  между экранами нет квантов. В состоянии с  $n = 1$  появился один квант с длиной волны  $\lambda = 2l$ . При  $n = 2, 3, \dots$  есть два, три и так далее квантов с этой длиной волны.

Для следующих стоячих волн с длинами  $\lambda = 2l, l, \dots, 2l/m$  можно повторить то же самое. Число  $n$  — номер возбуждения осциллятора — показывает число квантов с длиной волны  $\lambda_m = 2l/m$ .

Но обычно кванты принято характеризовать не длиной волны, а величиной, которая называется волновым вектором. Волновой вектор  $k$  просто связан с длиной волны:  $k = 2\pi/\lambda$ . Каждому  $k$  соответствует свой осциллятор и свои кванты, число которых равняется номеру возбуждения осциллятора.

А что будет в бегущей волне? Там тоже происходят периодические колебания, и энергию волны для каждого волнового вектора можно записать как энер-

гию осциллятора, изменяющуюся порциями  $\hbar\omega$ . Но бегущая волна обладает количеством движения, которое изменяется с номером возбуждения, т.е. с появлением каждого кванта. У волны с энергией  $E$  импульс  $p$  равняется энергии, деленной на скорость света:  $P = E/c$ , поэтому импульс кванта равен  $\hbar\omega/c$ . Вы видите, что импульс кванта точно так же связан с длиной волны, как и у частицы:  $p = \hbar\omega/c = 2\pi\hbar/\lambda$ . Значит, для бегущей волны кванты света можно считать де бройлевскими частицами — фотонами.

Для стоячих волн, например для сферических, средний импульс кванта равен нулю, и слово «фотон» к возбуждению таких осцилляторов неприменимо.

Итак, фотон — это порция возбуждения квантового осциллятора — бегущей электромагнитной волны с данным волновым вектором  $k$ .

Что такое «нулевые» колебания электромагнитного поля? Это нулевые колебания квантовых осцилляторов — электромагнитных волн со всевозможными волновыми векторами.

Конечно, мы еще не знаем английского слова gain, но уже, услышав его, смотрим на небо.

После того как стало ясно, что такое квант, исчез мучительный философский вопрос, проблема волн-частиц. Свет — это волна, энергия которой изменяется порциями, и, если мы рассматриваем бегущую волну, совокупность возбуждений фотонов напоминает газ частиц: у каждой есть определенная энергия и импульс.

Понять — значит уметь ответить на любой разумный вопрос. А разумными в физике считаются те, и только те, вопросы, ответы на которые могут быть проверены реальным или мысленным экспериментом.

**Существует ли пустота?** Что останется, если идеальный насос удалит из-под воздушного колокола все частицы? Что находится в межзвездном про-

странстве, где почти нет вещества? Что такое пустота — ничто, ящик для физических тел?

Развитие физики последних десятилетий показало, что пустота — вакуум — обладает интереснейшими свойствами, непохожими на свойства твердой среды, жидкости или газа; его изучение связано с самыми глубокими понятиями, такими, как причинность, связь геометрии с материей, свойства симметрии пространства и времени, связь симметрии с законами сохранения...

**Нельзя толкнуть, не прикасаясь.** Мы знаем, что тела действуют друг на друга при соприкосновении. Бросим в воду камень, от него побежит волна и всколыхнет плавающие ветки — воздействие в волне передается от точки к точке. Звук распространяется, потому что давление передается от одного объема среды к соседнему. Все вы видели на уроках физики, что, если выкачать из-под стеклянного колпака воздух, электрический звонок под колпаком продолжает работать, но перестает звучать — звук передается по воздуху. Электрические и магнитные силы, силы тяжести действуют и в пустоте; в пустоте распространяется свет, поэтому мы видим Солнце и звезды.

Почему железные опилки в пустоте притягиваются к магниту, а камень — к Земле? Физики объясняют это тем, что в пространстве вблизи магнита или вблизи Земли состояние пустоты изменяется — возникает поле. Электрическое поле действует на заряженное тело, магнитное — на магнит, поле силы тяжести — на камень, заставляя их двигаться. И каждый раз сила передается через пустоту от точки к точке как через невидимую жидкость. Этот механизм передачи воздействия называется ближкодействием. Но существовало и другое представление — дальнодействие: сила мгновенно передается на расстоянии от одного тела к другому. На основе этой идеи Ньютон построил свою теорию тяготения.

Идея дальнего действия противоречила распространению света, ведь свет имеет конечную скорость и проходит все промежуточные точки на линии светового луча — это хорошо видно в тумане. Как мы уже говорили, чтобы объяснить это, Ньютон предположил, что светящееся тело испускает частицы — корпускулы, — передающие свет. Тогда конечная скорость распространения света не противоречит идее дальнего действия, зато остаются без объяснения волновые свойства света. Разрешить это противоречие Ньютон не смог.

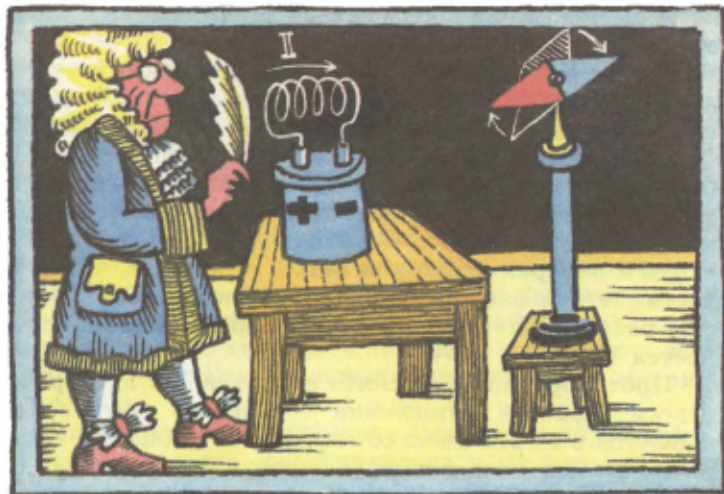
Если мы быстро сдвинем тело, изменится сила тяжести, действующая на другое тело. Но если оно далеко, то пройдет время, прежде чем оно получит толчок. Где же в это время находится возмущение? И на этот вопрос теория дальнего действия не смогла ответить. Поэтому многие физики от нее отказались.

Они предположили, что существует особая среда — эфир, — заполняющая пространство, и воздействие передается через нее. Вокруг заряженных и намагниченных тел эфир деформируется, и возникает сила, действующая на другое заряженное или намагниченное тело. Все было правильно, кроме одного — эфир пытались строить по образу и подобию твердых и жидких тел, а его нужно было изучать сам по себе.

**Свойства пустоты.** Если в проволочном кольце, окружающем магнитный поток, изменять магнитное поле, в нем возникает электрический ток. В пространстве вокруг потока возникло кольцевое электрическое поле. Оно заставляет двигаться заряды в проводнике и создает ток. Значит, переменное магнитное поле рождает в пустоте переменное электрическое.

В 1820 г. Ханс Кристиан Эрстед обнаружил, что ток, текущий по проводнику, создает вокруг себя кольцевое магнитное поле, вызванное движением зарядов. Джеймс Максвелл высказал гениальную до-





гадку о том, что магнитное поле создают не только движущиеся заряды, но и само переменное электрическое поле, так же как электрическое поле создается переменным магнитным.

Обнаружились два замечательных свойства пустоты, а из них третье, не менее важное, — в пустоте распространяются электромагнитные волны.

Когда вблизи антенны радиопередатчика возникает переменное электрическое поле, оно образует вокруг себя переменное магнитное поле такой же частоты, а магнитное — по закону Фарадея — создает уже в соседнем месте переменное электрическое... Так возмущение передается по всем направлениям.

Согласно уравнениям Максвелла, электромагнитные колебания должны распространяться со скоростью света. Естественно было прийти к заключению, что свет тоже электромагнитная волна. Открытия Максвелла были триумфом близкодействия — все

электромагнитные воздействия передаются через среду, эфир.

Но вот новая загадка: когда в эфире движется тело, движется ли с ним сам эфир? Эксперименты дали противоречивые результаты. В 1851 г. французский физик Арман Физо измерил скорость света в текущей воде и доказал, что свет частично захватывается движущейся средой. А об опыте Альберта Майкельсона мы уже рассказывали — он измерил скорость света вдоль и поперек движения Земли и доказал, что скорость света не зависит от движения источника и, если свет распространяется в эфире, эфир полностью увлекается Землей...

Противоречие было снято в начале XX в. теорией относительности Эйнштейна — скорость света складывается в опыте Физо со скоростью движения воды не арифметически, а по более сложной формуле. Скорость света вошла в механику и в теорию тяготения. Еще раз подтвердилась и была обоснована теория близкодействия: все воздействия — электромагнитное, гравитационное, ядерное — передаются от точки к точке с помощью соответствующих полей, со скоростью, не превышающей скорости света.

Эфир стал совершенно не нужен, его заменило новое непротиворечивое понятие — вакуум.

Ядерные силы, удерживающие в ядре нейтроны и протоны, с точки зрения близкодействия, тоже результат напряженного состояния вакуума — прибавилось еще одно свойство! А когда были созданы ускорители заряженных частиц, физики увидели, что при столкновениях нуклонов из пустоты рождается целый сноп различных частиц. Оказалось, что вакуум — пустое пространство — кишит частицами...

Но когда к электромагнитному полю и к полям, описывающим пары частиц — античастиц, применили квантовую механику, открылись новые, еще более странные и удивительные свойства вакуума.

**Виртуальные частицы.** Вспомним мудрое древнее

правило: «Повторение — мать учения» и коротко повторим: электромагнитное поле в ящике с отражающими стенками можно представить себе как набор осцилляторов — стоячих электромагнитных колебаний с разными длинами волн. Согласно принципу неопределенности, координата и импульс осциллятора не имеют определенных значений. Роль кинетической энергии этих осцилляторов будет играть энергия магнитного поля, а потенциальной — электрического. Волновая функция обычного осциллятора позволяет найти вероятность того или иного значения координаты или скорости, а волновая функция осциллятора электромагнитного поля дает вероятность того или иного значения электрического или магнитного поля.

Даже если в пространстве нет ни одной частицы, ни одного кванта, электрические и магнитные поля совершают нулевые колебания. Нулевые колебания заставляют дрожать электрон, движущийся в атоме, — он как бы превращается в шарик с радиусом, равным амплитуде дрожания, и слабее взаимодействует с ядром, чем точечный электрон. Это предсказание теории с большой точностью подтвердилось опытом.

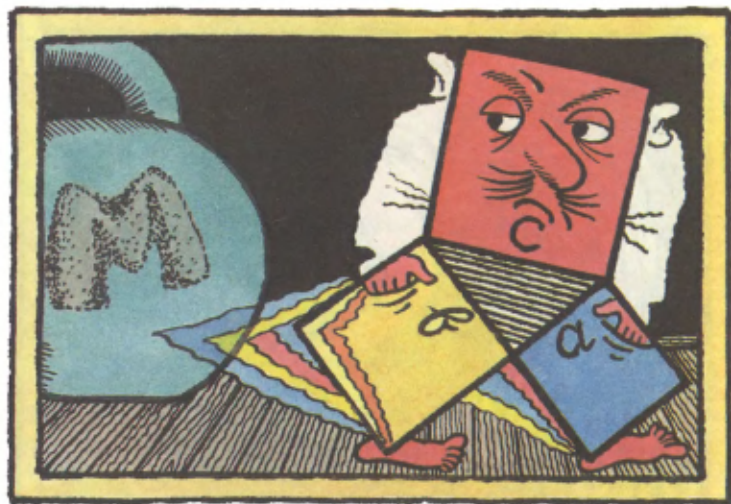
Нулевые колебания в вакууме полей, описывающих частицы со спином  $1/2$ , проявляются во временном рождении и уничтожении пар электрон — позитрон, нуклон — антинуклон... Вакуум наполнен такими не вполне родившимися частицами, которые появляются и тут же исчезают, — их называют виртуальными. И оказывается, что стóбит в вакууме столкнуться двум нуклонам или электрону с позитроном, как виртуальные частицы могут превратиться в реальные, так при столкновениях рождаются новые частицы. При сверхбольших энергиях сталкивающихся частиц из вакуума рождаются снопы различных частиц и античастиц. Когда сталкиваются два протона с большой энергией, возникают два снопа частиц, ле-

тящихся в направлении каждого из протонов. Чем больше энергия сталкивающихся протонов, тем больше частиц в снопах. Эти снопы в большом количестве можно наблюдать на фотопластинках при изучении космических лучей и в лабораториях на ускорителях большой энергии.

Когда частицы сталкиваются друг с другом, они отклоняются под разными углами. Чтобы сосчитать количество отклоненных частиц, достаточно знать, какую площадь затеняет каждый отдельный нуклон. Эта площадь называется поперечным сечением. Но длина волны сталкивающихся частиц мала, — значит, сечение должно определяться геометрическими размерами области взаимодействия частиц. А на опыте оно гораздо больше, сечение растет с энергией и может как угодно превысить геометрическое сечение! В чем же дело?

Оказывается, что реальная частица с большой энергией окружена облаком виртуальных частиц. Чем больше энергия частицы, тем больше размеры облака и тем легче виртуальные частицы в облаке сделать реальными. Достаточно краем облака задеть другую реальную частицу, как все виртуальные частицы в облаке превратятся в реальные, поэтому сечение растет с энергией.

**Мерцание геометрии.** А что же будет с гравитационным полем? И оно совершает нулевые колебания, и связанная с ним геометрия... тоже совершает нулевые колебания! Отношение длины окружности к радиусу в вакууме колеблется около евклидова значения. Чем меньше масштаб, тем больше отклонения от 2л. Конечно, эти колебания малы даже для самых малых размеров. Но физики все же нашли длину волны нулевых гравитационных колебаний, при которой не остается ничего похожего на нашу обычную геометрию. Эта длина (ее называют планковской) равна  $210^{-33}$  см.



Несмотря на свою невероятную малость, эта величина, которую даже неудобно называть величиной, может сыграть очень важную роль в будущей теории, призванной объединить все известные физические взаимодействия.

**Элементарные частицы.** Из чего же состоит вещество? — Из молекул. А молекулы? — Из атомов. — А атомы? — Из ядер и электронов. — А ядра? — Из нейтронов и протонов... Ну, кажется, дальше некуда — протоны, нейтроны и электроны были названы элементарными частицами. И вот то, что считалось концом истории, оказалось только предисловием к ней...

Не слишком ли их много?

Первым был открыт электрон. В 1897 г. его обнаружили независимо друг от друга английский физик Джеймс Томсон и немецкий ученый Эмиль Вихерт.



В 1905 г. Альберт Эйнштейн объяснил законы фотоэффекта на основании существования квантов электромагнитного поля — фотонов. Это элементарные частицы с нулевым зарядом и массой.

В 1913 г. Эрнест Резерфорд предсказал существование протона, а в 1920 г. он, одновременно с американским химиком Уильямом Харкинсом, выдвинул гипотезу о существовании нейтрона. Первая фотография следа протона была получена в 1925 г. англичанином Патриком Блэкеттом, а в 1932 г. Джеймс Чэдвик открыл нейтрон и вычислил его массу.

В 1928 г. Поль Дирак предсказал существование антиэлектрона — позитрона, и в 1932 г. его экспериментально открыл Карл Андерсон. Оказалось, что все элементарные частицы, кроме абсолютно нейтральных, вроде фотона, имеют античастицы, отличающиеся от них только знаком зарядов.

В 1930 г. Вольфганг Паули предположил существование еще одной элементарной частицы — нейтрино. В 1935 г. японский физик-теоретик Хидэки Юкава выдвинул гипотезу об элементарных частицах — переносчиках ядерных сил, которые были названы мезонами; в 1938 г. в космических лучах был обнаружен мюон, в 1947 г. открыт пи-мезон, в 1949 г. — К-мезон, или каон...

**Внутренняя симметрия элементарных частиц.** Бросается в глаза необыкновенное сходство некоторых частиц, например нейтрона и протона или положительного, отрицательного и нейтрального пи-мезонов. Масса нейтрона и протона совпадает с точностью до одной десятой процента, спин обеих частиц  $\frac{1}{2}$ , они одинаково взаимодействуют с другими частицами. Недаром их объединили одним названием — нуклон, — и, значит, протон и нейтрон можно считать двумя состояниями одной частицы, отличающимися зарядами.

Три пи-мезона — это тоже как бы одна частица, которая может находиться не в двух, а в трех состояниях. Такие состояния называются изотопическими от слова «изотоп», которое обозначает разновидности одного и того же элемента, отличающиеся числом нейтронов в ядре.

Изотопические состояния характеризуются изотопическим спином, или изоспином. Его свойства напоминают свойства обычного спина, хотя это физически разные величины. Предположим, что изоспин 1 имеет, как и спин, три проекции, а изоспин  $1/2$  — две. Нуклон имеет два изотопических состояния — его изоспин равен  $1/2$ , а протон и нейтрон соответствуют двум проекциям:  $1/2$  и  $-1/2$ . Изоспин пи-мезона 1, а положительный, отрицательный и нейтральный пи-мезоны соответствуют трем проекциям: положительный 1, нейтральный 0 и отрицательный  $-1$ .

Существует закон сохранения изоспина: во всех сильных взаимодействиях элементарных частиц полный изоспин сохраняется. Ну а это верный признак того, что существует симметрия, и, действительно, сильные взаимодействия обладают изотопической инвариантностью: они не зависят от того, в каком изотопическом состоянии находятся взаимодействующие частицы. Симметрия эта неточная, ведь частицы разных зарядов имеют хоть и очень близкие, но все же неравные массы.

Когда обнаружилась еще одна группа элементарных частиц — гипероны — лямбда-частица, сигма, кси, омега, у них оказалась особая внутренняя характеристика, «странность».

Она проявляется в том, что эти частицы рождаются вместе с другими странными партнерами, так, чтобы суммарная странность равнялась нулю. Лямбда-частица очень похожа на нуклон, только у нуклона странность равна нулю, у лямбды  $-1$ , у анти-



лямбды  $+1$ . Если предположить, что странность сохраняется, станет ясно, что в реакциях с участием нуклонов и пи-мезонов может родиться пара лямбда — антилямбда, или другая комбинация, странность которой равна нулю, как у нуклонов.

Элементарных частиц оказалось так много и свойства их оказались настолько разными, что их пришлось распределить по семействам, используя основные характеристики — массу, электрический заряд и спин частиц.

Предсказанный Эйнштейном фотон — сам по себе семейство, его масса и заряд равны нулю, спин 1.

Вторая группа частиц называется лептонами (от греч. leptos — легкий), сюда входят электрон, мюон, нейтрино — их спин равен  $1/2$ .

Еще одно семейство — сильновзаимодействующие частицы — адроны, «массивные». Внутри семейства существуют две ветви — мезоны и барионы. Спин мезона целый. Мезоны со спином 0 образуют семейство из восьми частиц. К барионам относятся нуклоны и гипероны с полуцелым спином: восемь барионов со спином  $1/2$  и десять со спином  $3/2$ .

Все сильновзаимодействующие частицы обладают еще одним свойством: число барионов не изменяется при их столкновениях, они могут только переходить друг в друга; точнее, не изменяется разность барионов и антибарионов. Это свойство можно назвать законом сохранения барионного заряда. Для этого достаточно приписать каждому бариону барионный заряд 1, а антибариону — 1. Барионный заряд пи-мезонов, которые могут рождаться в любом количестве, следует считать равным нулю.

Создание мощных ускорителей и чувствительных методов обнаружения привело к открытию громадного количества новых частиц. Чтобы классифицировать их, приходилось предполагать новые, более широкие симметрии, которые включили бы все но-

вые свойства. Изобилие частиц уже не радовало, а только озадачивало теоретиков.

И они стали пытаться найти праматерию или прачастицы, чтобы все обилие вновь открытых частиц получалось из комбинаций нескольких — элементарных.

**Кварки — составные части протонов и нейтронов.** Как ни пытались теоретики составить мезоны и барионы из частиц с целым электрическим и барионным зарядом, ничего не получалось.

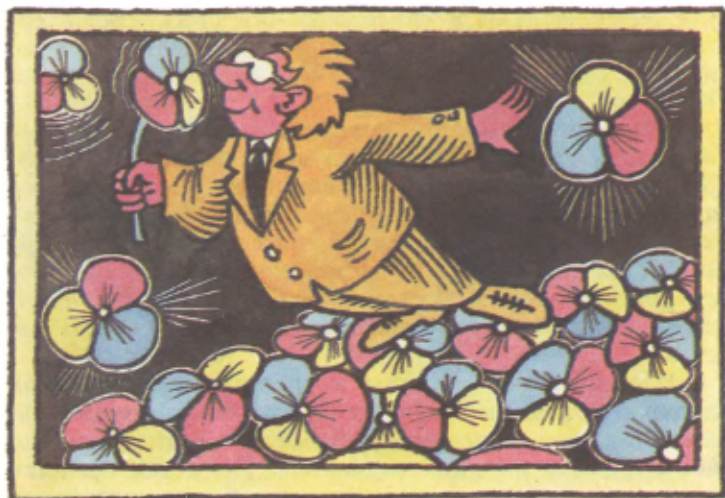
Тогда американские теоретики Марри Гелл-Ман и, независимо, Джордж Цвейг предположили, что все адроны состоят из частиц с барионным зарядом, равным  $1/3$  нуклонного, и с электрическим, равным  $2/3$  или  $-1/3$  заряда протона. Идея показалась настолько дикой, что статью Гелл-Мана отказались печатать журналы! Он назвал частицы с дробным зарядом кварками.

Произошло то, чего никто не ожидал: все адроны, как по мановению волшебной палочки, улеглись в найденные раньше группы с одинаковыми свойствами.

Барионы можно составить из троек кварков, тогда барионный заряд будет равен 1. Спин кварков равен  $1/2$ , из тройки кварков можно составить две комбинации: одну со спином  $1/2$  и вторую со спином  $3/2$ , поэтому и возникают две группы барионов со спином  $1/2$  и  $3/2$ .

Понадобилось ввести кварки трех типов: *u*, *d*, *s* — «верхний» (по-английски *up*), «нижний» (*down*) и «странный» (*strange*). Электрический заряд *u*-кварка  $2/3$ , *d*- и *s*-кварков  $-1/3$ ; у *s*-кварка, который входит только в странные адроны, странность 1, у *d*- и *u*-кварков странность 0.

В десятке барионов со спином  $3/2$  есть частица дельта-барион. При рассеянии пи-мезонов на нуклоне пи-мезон и нуклон на время объединяются в



дельта-барион. Эту частицу трудно увидеть в свободном состоянии, она быстро распадается, но отчетливо проявляется в рассеянии пи-мезонов на нуклонах. Раз нуклон и пи-мезон не странные частицы, то и странность дельты равна нулю, она состоит из  $u$ - и  $d$ -кварков. Было обнаружено четыре разновидности дельта-бариона, которые отличаются знаком заряда.

Все их можно построить из троек кварков, и заряды у этих дельта-барионов будут  $-1, 0, 1, 2$ . Вот и все возможности, значит, других дельта-барионов нет.

Посмотрим внимательно на дельта плюс-плюс барион. Он состоит из трех  $u$ -кварков, чтобы полный заряд был  $2 = 3 \times \frac{2}{3}$ . Но ведь спин дельты  $\frac{3}{2}$ , значит, проекции спинов всех трех  $u$  должны быть одинаковы и равны  $\frac{1}{2}$ .

А как же быть с принципом Паули, о котором

мы рассказывали в главе о симметриях? Ведь, согласно этому правилу, частицы с полуцелым спином не могут находиться в одном и том же состоянии. Как обойти запрет?

Тщательный анализ показал, что бывают разные  $u$ - и  $d$ -кварки! Наши кубики — кварки — надо раскрасить! Разноцветные кварки могут находиться в одном состоянии, и все остается на своих местах: кварк может иметь один из трех цветов, красный, синий или желтый... Конечно, можно было бы просто пронумеровать кварки, но это было бы скучно, мы уже знаем, как ценят физики красоту и изящество.

И вот дробные заряды и трехцветность кварков подтвердились многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями, только все же найти кварки не удалось! Придется принять как закон природы, что кварки не вылетают из адронов даже при энергичных столкновениях. В свободном состоянии могут находиться только «белые» частицы — адроны и лептоны, а цветные нельзя удалять друг от друга.

В ускорителе на встречных пучках при больших энергиях сталкиваются электрон и позитрон. Рождается пара кварк — антикварк, и тут же возникают другие цветные пары и группируются в белые комбинации — барионы и мезоны. До того как кварк и антикварк превратятся в белые частицы, они связаны силовыми взаимодействиями. Но если сила, с которой в электродинамике притягиваются два противоположных заряда, убывает с расстоянием, то сила, скрепляющая кварк и антикварк, не убывает, а остается постоянной. Рождаясь, кварк и антикварк разлетаются, кинетическая энергия превращается в потенциальную энергию их притяжения, как у двух шаров, скрепленных пружиной. С ростом потенциальной энергии пружина рвется, и система пре-



вращается в два летящих в разные стороны снопа белых частиц.

Типы кварков красиво назвали ароматами — верхний, нижний и странный мы уже знаем, пришлось ввести еще «очарованный» и «красивый»; теория предсказывает еще один аромат — «высший».

**Глюонное поле.** Что же это за поле, удерживающее кварки внутри адронов? Его назвали глюонным от английского слова glue — «клей». Оно подобно электромагнитному полю, удерживающему внутри атома электрон: согласно квантовой механике, энергия глюонного поля также изменяется скачкообразно, уравнения глюонного поля находят по образу и подобию уравнений электродинамики, порция его энергии называется глюоном, подобно порции энергии электромагнитного поля — фотону... Но есть и важное отличие: если электрон несколько не меняется от взаимодействия с электромагнитным полем, то кварки, взаимодействуя с глюонным, могут изменять цвет.

Не так уж много лет прошло — в историческом масштабе — с открытия первой элементарной частицы, и как много сделано за это короткое время! Но и этого всего недостаточно, нужно еще найти уравнения, описывающие глюонные поля и их взаимодействие с кварками, эти уравнения предстоит решить, выразить массы всех адронов и их взаимодействия через свойства новых частиц, которые пока считаются элементарными, — глюонов и кварков... Все эти задачи еще ждут своих исследователей.

**Поиски единства.** На протяжении всей своей истории физика ищет единые причины для самых разных явлений, пытается объединить свои области. «Чем сложнее обилие новых фактов, чем пестрее разнообразие новых идей, тем повелительней звучит призыв к объединяющему мировоззрению». В этих словах Германа Гельмгольца выражена суть главной тенденции в развитии науки.

Еще древние догадывались, что великое многообразие веществ в природе объясняется различными комбинациями гораздо меньшего числа первичных частиц — атомов. Ньютон доказывает, что падение тел на Земле и движение небесных тел определяются одной причиной — притяжением с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния; Максвелл получает уравнения, объединяющие все явления электричества, магнетизма, оптики; в наше время ученые пытаются объединить все известные физические взаимодействия...

Самые первые исследования атомных ядер добавили к известным взаимодействиям — электромагнитному и гравитационному — еще одно, «сильное». Сильное взаимодействие в десятки раз больше электромагнитного, оно удерживает нейтроны и протоны в ядре. К тому же были обнаружены силы между электронами, нейтрино и нуклонами. Эти

силы — «слабые взаимодействия» — меньше электромагнитных, но больше гравитационных, они ответственны за радиоактивный распад. Итак, взаимодействий — четыре. И оказалось, что электромагнитное и слабое взаимодействия есть проявления более общего, единого взаимодействия — «электрослабого». Неожиданные связи, новые предсказания, объяснения загадочных явлений принесло такое объединение науки. Недавно теория электрослабого взаимодействия получила блестящее подтверждение: в ЦЕРНе, Европейской организации ядерных исследований, открыты предсказанные теорией частицы — «промежуточные» бозоны.

«Великим объединением» назвали физики теорию, которая должна дать единое объяснение трем взаимодействиям: электромагнитному, слабому и сильному. Эта теория еще далека от завершения, но ее предсказания уже проверяются на опыте. Великое объединение предсказывает, что протон за  $10^{30}$  —  $10^{33}$  лет распадается на позитрон и нейтральный пи-мезон или на нейтрино и положительный пи-мезон. Проверка уже началась в нескольких лабораториях, и, если опыт подтвердит распад протона, значит, теория на верном пути.

А что же четвертое взаимодействие? Его не забыли, и в последнее время многие теоретики уже пытаются создать теорию суперобъединения, которая включила бы в единую картину все четыре взаимодействия — электромагнитное, слабое, сильное и гравитационное.

Задача невероятно сложная, и, наверно, пройдет немало времени, прежде чем откроется та величественная простота и стройность, что скрыта во Вселенной.

## Еще несколько слов.

Мне не хочется называть эти строки «заключением» или «прощанием с читателем», хочется надеяться, что это не заключение, а вступление, не прощание, а недолгая разлука. Следующая наша встреча с кем-то из вас произойдет в аудиториях института, на научных конференциях, на страницах журналов, где появятся ваши статьи...

Вспомним еще раз слова великого Эйнштейна, говорившего о наследии, доставшемся нам от предшественников: «На новое поколение падает задача нахождения путей правильного использования переданного нам дара. Только решив эту задачу, новое поколение окажется достойным этого наследия и действительно станет счастливее предыдущих поколений».



## Содержание

### Вступление

**3**

Наблюдение —  
теория —  
эксперимент. . .

**6**

Краеугольные  
камни

**45**

Как создавалась  
квантовая теория

**69**

Теория относитель-  
ности

**85**

Квантовая теория  
поля

**102**

Еще несколько слов

**126**





# Как рождаются физические тео- рии

Аркадий  
Бенедиктович  
Мигдал

ДЛЯ СРЕДНЕГО И СТАРШЕГО  
ШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА

Художник  
Ю. В. Дмитрук

Зап. редакцией  
В. Ю. Кирьянов  
Редактор  
Н. Н. Габисония  
Мл. редактор  
Т. В. Плотникова  
Художественный  
редактор  
Л. А. Бабаджалиян  
Технические  
редакторы  
Т. Е. Морозова,  
О. В. Журкина  
Корректоры  
В. С. Антонова,  
Т. П. Берлинова.

НБ № 853

Сдано в набор 12.12.83.  
Подписано в печать  
24.08.84. А11085.  
Формат 70×100 1/32. Бу-  
мага офсетная № 1.

Печать офсетная. Гарни-  
тура школьная. Усл.  
печ. л. 5,16.

Уч.-изд. л. 5,60. Усл. кр.-  
отт. 22,14. Тираж 300 000  
экз.

Заказ 39 Цена 40 коп

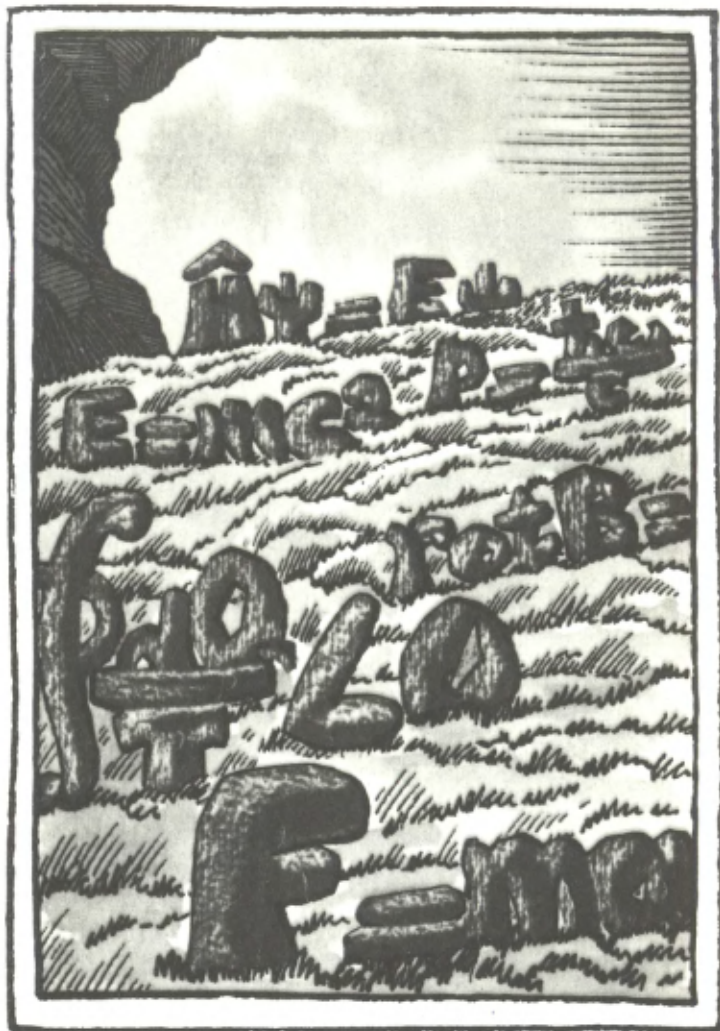
Издательство «Педаго-  
гика» Академии педагоги-  
ческих наук СССР и Госу-  
дарственного комитета  
СССР по делам изда-  
тельств, полиграфии и  
книжной торговли.

Москва, 107847, Лефор-  
товский пер., 8.

Набрано во 2-й типогра-  
фии издательства «Нау-  
ка» 121099 Москва, Шу-  
бинский пер. 6. Отпечата-  
но с пленок на Ордена  
Трудового Красного Зна-  
мени Калининском по-  
лиграфическом комби-  
нате Союзполиграфпрома  
при Государственном  
комитете СССР по делам  
издательства, полиграфии  
и книжной торговли.  
г. Калинин, пр. Ленина, 5.



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
"ПЕДАГОГИКА"



Читайте  
следующую  
книгу  
библиотечки  
"Ученые  
школьнику!"

Как человек контролирует работу  
автоматики?



Что общего между космонавтом и  
кузнецом, между пилотом и физи-  
ком-экспериментатором?



Что такое психология активности?



Как измеряют объем оперативной  
памяти?



Что такое эмоции, внимание, твор-  
ческое мышление?

На все эти вопросы отвечает  
книга "Человек и автоматы", кото-  
рую написал член-корреспондент  
АН СССР В. Ф. Ломов, директор  
Института психологии АН СССР  
и президент Общества психологов  
СССР.



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
"ПЕДАГОГИКА"