

АТОМЫ • ЭЛЕКТРОНЫ • ЯДРА

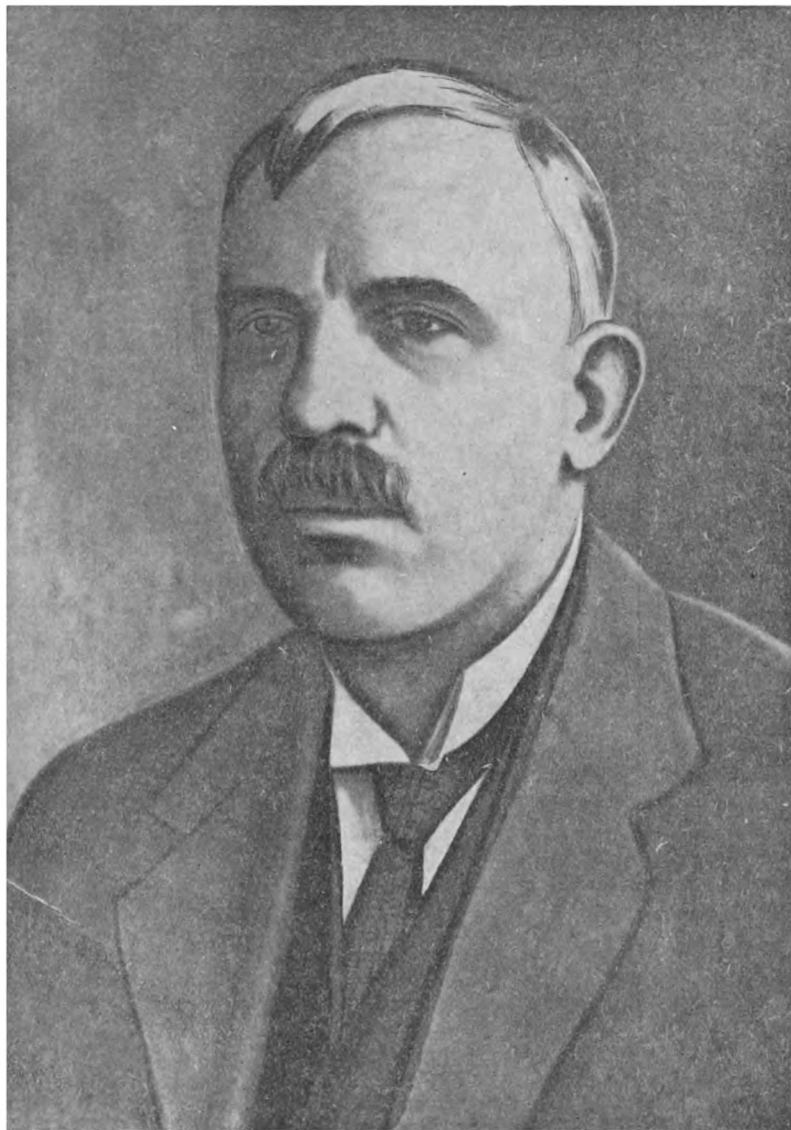
М.П. Бронштейн

М.П. Бронштейн

# АТОМЫ ЭЛЕКТРОНЫ ЯДРА



ОНТИ • 1935



*ЭРНЕСТ РЕЗЕРФОРД*



*М. П. Бронштейн*

*Атомы,  
электроны,  
ядра*



*Главная редакция  
юношеской и научно-популярной литературы  
Ленинград 1935 Москва*







## *Глава первая*

### ЗАГАДКА РАДИОАКТИВНОСТИ

**В** этой книжке вы найдете рассказы о проникательных сыщиках, разгадывающих самые головоломные загадки, самые непонятные тайны на свете. Но только не думайте, что эта книжка будет похожа на другие книжки о сыщиках — на книжки об отважном Нате Пинкертоне или о хладнокровном Шерлоке Холмсе, о которых вы с таким увлечением читали в детстве. Сыщики, которых вы встретите здесь, очень мало напоминают обычных героев детективных книжек. Они не служат в полиции, не преследуют по пятам знаменитых преступников, не носят револьвера в кармане и полицейского значка под отворотом пиджака. Возможно, что они даже удивились бы, если бы узнали, что их называют сыщиками. Они — ученые люди, по целым дням сидящие в лабораториях, склоняясь над своими приборами, фотографическими снимками, листами с вычислениями. Да и тайны им приходится раскрывать не такие, как Шерлоку Холмсу или Нату Пинкертону. В этой книжке не будет ни загадочных пятен крови на измятой траве, говорящих о нераскрытом убийстве, не будет таинственных подземелий, адских машин, поддельных банковских чеков. Тайны, с которыми имеют дело герои нашей книжки, — совсем не такие: это тайны невидимых маленьких частиц, из которых построено все на свете: вода, воздух, лед, железо, дерево, да и мы сами, — это тайны электричества, тайны лучей света, тайны далеких мерцающих звезд.

Многие из этих тайн еще и до сих пор не разгаданы; другие разгаданы уже давно, третьи совсем недавно. Для того, чтобы разгадать эти тайны, нашим сыщикам понадобилось еще больше проницательности, остроумия, упрямства, настойчивости и мужества, чем понадобилось бы самому Шерлоку Холмсу для того, чтобы раскрыть самое загадочное преступление на свете.

Как и всякая другая книжка о сыщиках, наша книжка начинается с головоломной загадки, которую нашим сыщикам предстояло разгадать. Дело было зимой в самом начале 1896 года. Эта зима была одной из самых замечательных зим в истории: в течение этой зимы немецкий профессор Рентген сделал поразительное открытие, навеки обессмертившее его имя, — открытие лучей, которые теперь всем известны под названием рентгеновских. Теперь уже все привыкли к этим лучам, которые свободно проходят через дерево, через человеческое тело, через тонкие металлические листки, — все мы много слышали о рентгеновских лучах и давно перестали им удивляться, — но представьте себе, как удивились люди, слышавшие об этом открытии в первый раз!

Среди людей, которых восхитило и поразило до глубины души великое открытие Рентгена, был и тот, с приключений которого начнется наша книжка. Он был профессором химии в Париже. Звали его Анри Беккерель.

20 января 1896 года — день, когда начинается история, которую мы хотим рассказать, — Анри Беккерель отправился по своему обыкновению на собрание Парижской Академии Наук. Собрание должно было быть очень интересное: все знали, что один из академиков — знаменитый математик Пуанкаре — получил от самого Рентгена подробное письмо о только что открытых лучах. К письму Рентген приложил фотографические снимки: это были первые фотографии, сделанные не обыкновенными видимыми лучами света, а рентгеновскими лучами. В повестке, которая была заранее разослана всем

парижским ученым, было напечатано, что на этом собрании Пуанкарэ прочитает вслух полученное им письмо и покажет фотографии. Задолго до начала заседания огромный зал парижской Академии Наук был переполнен. Сюда пришли не только профессора, но и студенты многочисленных высших школ города Парижа, пришли с неизменными своими блокнотами и маленькими фотографическими аппаратами корреспонденты всех газет, чтобы в тот же день поместить в вечерних выпусках сенсационные отчеты о заседании Академии и о письме знаменитого Рентгена, пришла и просто любопытствующая публика — «публика с улицы», как ее презрительно называли студенты и профессора. Когда в наступившей тишине Пуанкарэ начал громко читать по-немецки полученное им письмо, все присутствующие приложили к уху ладонь, чтобы получше расслышать (а особенно внимательный вид был у тех, которые ни слова не понимали по-немецки, но ни за что не хотели в этом признаться). Но вот чтение окончилось и среди известных парижских ученых, сидевших в первых рядах кресел, началось публичное обсуждение письма Рентгена. В этом обсуждении принял участие и Беккерель. Его очень заинтересовал вопрос о том, из какого именно места рентгеновской трубки выходят открытые Рентгеном лучи. А нужно сказать, что эта трубка была не такая, как те усовершенствованные рентгеновские трубки, которые употребляются теперь. В теперешних трубках то место, из которого во все стороны расходятся рентгеновские лучи, — это массивный кусок тугоплавкого металла. А в первой трубке, которую построил Рентген, лучи расходились от одного местечка на стекле трубки. Когда трубка работала, то на ее стеклянной стенке появлялось маленькое светящееся пятнышко. Оно светилось холодным зеленовато-желтым светом и как раз от него во все стороны расходились рентгеновские лучи. Сами рентгеновские лучи невидимы глазу, но зелено-желтое свечение на стекле трубки, конечно, видимо, и значит одно и то же местечко на стекле трубки

испускает и видимые глазу лучи зеленовато-желтого света и невидимые рентгеновские лучи. Вот это-то холодное зелено-желтое свечение на стеклянной стенке трубки, о котором говорил в своем письме Рентген, страшно поразило Беккереля — он даже прервал чтение Пуанкаре и попросил его снова перечитать поразившее его место письма. И Беккерелю пришла в голову неожиданная мысль, — а что, если свечение стекла рентгеновской трубки как раз и есть настоящая причина испускания рентгеновских лучей? Эта мысль взволновала Беккереля. Холодное зеленовато-желтое свечение, испускаемое стеклянной стенкой трубки, о котором говорилось в письме Рентгена, напомнило Беккерелю другой, хорошо ему знакомый свет, — свет, испускаемый «флюоресцирующими» веществами. Флюоресцирующие вещества — вот что было любимой научной специальностью Анри Беккереля, постоянным предметом его мыслей, разговоров и даже ночных снов. Что же это за такие вещества, изучению которых Беккерель посвятил несколько десятков лет своей жизни?

Флюоресцирующие вещества — это такие, которые в темноте не светятся, но стоит только поставить их на яркий солнечный свет, как они начинают светиться. Существует, например, такой минерал флюорит (его еще иначе называют плавиковым шпатом); сам по себе он не светится, но как только на него попадут яркие солнечные лучи, он тотчас же начинает испускать синевато-фиолетовый свет. Флюорит — это одно из самых известных флюоресцирующих веществ; даже самое слово «флюоресцировать» происходит от слова флюорит: оно, собственно говоря, означает «вести себя как флюорит». Многие другие вещества тоже сильно флюоресцируют: например раствор сернокислого хинина, выставленный на солнце, светится голубыми лучами, раствор хлорофилла — красными. Флюоресцирует даже и обыкновенный керосин, хотя довольно слабо: если бутылку с керосином поставить на солнце, то она начинает испускать слабенькое синее сияние.

Обо всех этих веществах вспомнил Анри Беккерель, как только услышал о зеленовато-желтом свете, похожем на свет флюоресцирующих веществ (так и писал Рентген в своем письме), которым сопровождается испускание рентгеновских лучей. — «Как знать? — подумал Беккерель — может быть флюоресценция и рентгеновские лучи всегда неразлучны; может быть не только стекло рентгеновской трубки, флюоресцируя, испускает рентгеновские лучи, но и плавиковый шпат, и сернокислый хинин, и хлорофилл, и даже самый обыкновенный керосин, который торговцы развозят в своих тележках по парижским улицам и продают домашним хозяйкам, — может быть даже и этот керосин испускает рентгеновские лучи в то время, как флюоресцирует на солнечном свете». Вот такая мысль запала в голову Беккереля, и он в волнении ушел домой, решив поскорее приступить к опытам, чтобы проверить свою догадку.

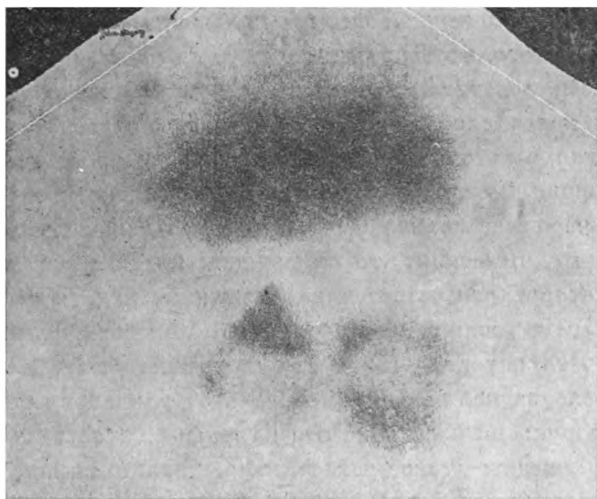
Несколько дней размышлял Беккерель о том, какой бы сделать опыт, чтобы узнать, действительно ли флюоресцирующие вещества испускают и рентгеновские лучи в то самое время, пока они светятся. В конце концов Беккерель придумал вот что: он возьмет фотографическую пластинку, завернет ее в черную бумагу для того, чтобы ни один солнечный луч не мог упасть на эту пластинку, положит сверху кусок какого-нибудь флюоресцирующего вещества, а затем выставит все это на солнце. Если верно, что флюоресцирующее вещество, освещенное солнцем, не только светится видимым светом, но и испускает невидимые глазу рентгеновские лучи, то эти лучи пройдут через черную бумагу и отпечатаются на фотографической пластинке. Если же рентгеновских лучей нет, то ничего на пластинке не отпечатается — ведь от всех видимых лучей она прекрасно защищена оберткой из черной бумаги. Надо сказать, что за много лет своей работы над флюоресцирующими веществами Анри Беккерель собрал огромнейшую коллекцию этих веществ: нигде в мире, ни в одном му-



зее не было такой. Долго стоял Беккерель перед своим шкафом с флюоресцирующими веществами, желая выбрать такое, которое флюоресцировало бы посильнее. «Вероятно — думал Беккерель — чем сильнее вещество флюоресцирует, тем больше оно испускает рентгеновских лучей, а значит мне будет тем легче и удобнее их обнаружить.» Наконец, после долгих колебаний, он остановился на веществе, которое он когда-то — лет за пятнадцать перед этим — сам приготовил в своей химической лаборатории. Это вещество называлось «двойная сернокислая соль урана и калия». У Беккереля было несколько лепешек этого вещества с таким длинным названием. Все они прекрасно флюоресцировали: стоило только им попасть на солнце, как они начинали испускать яркое зеленое сияние. Беккерель положил лепешку с двойной сернокислой солью урана и калия на фотопластинку, завернутую в черную бумагу, и выставил все это на солнце. Через несколько часов он проявил и отфиксировал пластинку. К его радости оказалось, что на пластинке действительно отпечаталось изображение лепешки. Выходило, что он был прав: флюоресцирующие вещества действительно испускают рентгеновские лучи.

Беккерель был очень доволен собой: ведь столько лет никто (да и он сам) не замечал, что флюоресцирующие вещества испускают рентгеновские лучи, и вот теперь ему впервые посчастливилось это заметить. Но все-таки он не торопился напечатать в журнале Академии Наук сообщение о своем открытии. Как часто бывает, что самое несомненное, казалось бы, открытие потом оказывается просто ошибкой! Поэтому Беккерель решил повторить свой опыт еще раз, и еще раз, пока, наконец, он не убедится, что все это действительно так и что никакой ошибки быть не может. Он взял несколько еще нетронутых фотопластинок, завернул их в черную бумагу и стал их выставлять на солнце, положив на каждую из них кусочек флюоресцирующего вещества. Такие опыты он

делал довольно долго — несколько недель, как вдруг случилось странное происшествие, которое показало Беккерелю, что дело не так просто, как ему казалось раньше. Произошло вот что: в то время, пока Беккерель трудился в своей лаборатории, придумывая все новые и новые опыты для изу-



**Фотографический снимок, который привел Беккереля к открытию радиоактивности.**

Запись в протоколах Беккереля об этом снимке гласит: „26 февраля-1 марта 96. Двойная серноокислая соль урана и калия. Черная бумага. Тонкий медный крестик. Экспозиция на солнце 27-го и на рассеянном свете 26-го. Проявлен 1 марта“.

чения тех рентгеновских лучей, которые испускает флюоресцирующая лепешка двойной серноокислой соли урана и калия, наступили пасмурные дни. Напрасно Беккерель выносил на балкон свои фотографические пластинки с лепешками серноокислой соли,—солнце было закрыто тучами, и лепешки упорно не хотели флюоресцировать. Пришлось Беккерелю прекратить свои опыты, запереть все свои пластинки и лепешки в ящик стола и ждать солнечных дней.

1 марта 1896 года Беккерель (от скуки или от нечего делать) вздумал проявить одну из таких фотопластинок, положенных им в ящик письменного стола. Эту фотопластинку он пробовал за несколько дней перед этим — 26 февраля — выставить на солнце вместе с лепешкой сернокислой соли; пластинка была, как всегда, завернута в черную бумагу, а между ней и лепешкой он еще положил маленький медный крестик для того, чтобы узнать, смогут ли рентгеновские лучи, испускаемые лепешкой, пройти не только через черную бумагу, но и через слой меди. Солнце показывалось из-за туч очень редко, а потому Беккерель очень скоро убрал свою пластинку в ящик вместе с лежащим на ней крестиком и лепешкой.

Когда через несколько дней, 1 марта, Беккерель вздумал проявить эту пластинку, то он ожидал, что изображение лепешки, которое отпечатается на пластинке, будет очень слабое: ведь солнца было мало, и лепешка флюоресцировала очень недолго. Но когда пластинка была проявлена и Беккерель на нее взглянул, он едва от удивления не выронил ее из рук: на пластинке отпечаталось резкое темное изображение лепешки — такое резкое, какое никогда не получалось в прежних опытах Беккереля, в которых лепешка ярко флюоресцировала в течение нескольких часов. А на фоне темного изображения лепешки выделялось светлое изображение креста: лучи, испускаемые лепешкой, не смогли пройти сквозь медь креста, как прошли через черную бумагу, и поэтому под крестом пластинка осталась такой, какой была, — незачерненной.

Удивление Беккереля было безгранично. Ведь, лежа в темном ящике стола, лепешка не могла флюоресцировать, как она флюоресцирует на солнечном свете, а, между тем, изображение на фотопластинке получилось резкое и отчетливое, как будто бы невидимые лучи, проходящие через черную бумагу, действовали на пластинку очень долго. Выходило, что лепешка продолжала и в темноте посылать свои невидимые

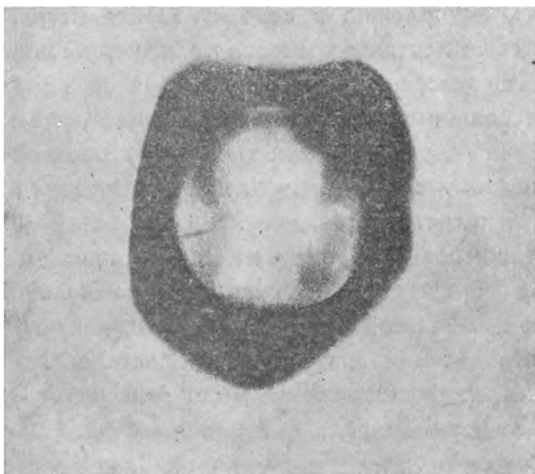
глазу лучи, действующие на фотографическую пластинку. Зачем же было тогда выставлять лепешку на солнце, когда даже в темноте она испускает те же самые лучи? Лепешка двойной сернокислой соли урана и калия — и на солнце, когда она ярко флюоресцирует, и в темноте, когда она не светится вовсе — одинаково испускает какие-то невидимые глазу лучи, похожие на лучи Рентгена. Вот какой неожиданный для себя вывод должен был сделать Анри Беккерель в этот пасмурный день 1 марта 1896 года. Его первоначальная догадка о том, что флюоресценция неразлучно связана с испусканием рентгеновских лучей, все-таки в конце концов оказалась неверной. Но вместе с тем Беккерель увидел, что двойная сернокислая соль урана и калия обладает каким-то загадочным свойством, о котором до тех пор никто не подозревал.

И вот Беккерель принимается за новую работу: он должен исследовать открытое им свойство двойной сернокислой соли урана и калия, найти с чем это свойство связано, какие особенности двойной сернокислой соли урана и калия делают ее способной испускать невидимые глазу лучи. И Беккерель роется в своей коллекции флюоресцирующих веществ, берет оттуда одно вещество за другим и делает с каждым таким веществом опыт: не испускает ли и оно такие же лучи, какие испускает двойная сернокислая соль урана и калия? Несколько недель напряженной работы, и Беккерель приходит к следующему заключению: из всех флюоресцирующих веществ, взятых им для опыта, только те испускают невидимые глазу лучи, в состав которых входит уран (уран — это металл, который вместе с другим металлом — калием — входит в состав двойной сернокислой соли урана и калия). Флюоресцирующие вещества, в которых нет урана, не испускают никаких невидимых глазу лучей, — держать ли их на солнце или в темном шкафу, — а те флюоресцирующие вещества, в кото-

рых содержится уран, всегда испускают невидимые лучи, заставляющие фотографическую пластинку чернеть, — даже если она завернута в плотную бумагу. И они испускают эти невидимые лучи и днем и ночью совершенно независимо от того, освещены ли они и светятся ли они или нет.

Оставалось сделать еще последний шаг — взять какое-нибудь вещество, которое содержит в себе уран, но никогда не флюоресцирует, и посмотреть, будет ли оно испускать невидимые лучи. Беккерель поступил очень просто: он взял чистый металл уран. Уран — довольно редкий и дорогой металл, но все же в лаборатории Беккереля нашлась щепотка чистого урана в виде порошка, и еще несколько кусочков урана ему на время дали знакомые химики. Сам уран никогда не флюоресцирует, сколько бы его ни освещали солнечные лучи. Но когда Беккерель положил кусочек урана на фотографическую пластинку, завернутую в черную бумагу, то пластинка, проявленная через несколько часов, почернела от действия невидимых лучей, которые испускал уран. Значит, эти таинственные лучи, которые открыл Беккерель и которые так похожи на лучи, открытые Рентгеном, не имеют ровно ничего общего с флюоресценцией. Сам металл уран обладает чудесным свойством испускать эти лучи; он испускает их и когда он находится в чистом виде, и когда он соединен с какими-нибудь другими веществами (например в двойной сернокислой соли урана и калия, где уран соединен с калием, с серой и кислотой). Уран испускает эти лучи совершенно независимо от того, освещает ли его в это время солнце или нет. Испускание лучей зависит только от количества самого урана — чем больше урана, тем больше и лучей — и ни от чего другого не зависит. Когда Беккерель, слушая чтение письма Рентгена, вообразил, что испускание рентгеновских лучей связано с флюоресценцией, то в этой мысли не было ничего верного. И если бы он взял для своего опыта не флюоресцирующую сернокислую соль, содержащую в себе уран, а плавиковый

шпат или раствор хлорофилла, то из его опытов решительно ничего не вышло бы. Но по счастливой случайности Беккерель выбрал из всей своей огромной коллекции именно сернокислую соль урана и калия, и это помогло ему открыть удивительное свойство урана: способность без всякой видимой причины испускать лучи, похожие на лучи Рентгена.



Фотография алюминиевой медали в лучах урана, снятая Беккерелем. Экспозиция — две недели.

Отличаются ли лучи, открытые Беккерелем, чем-нибудь существенным от лучей Рентгена — этого и сам Беккерель в первое время не мог решить. Лучи Беккереля, как и лучи Рентгена, невидимы глазу, проходят через бумагу, дерево, тонкие слои металла, чернят фотографическую пластинку. Очень скоро Беккерель открыл еще одно замечательное свойство лучей, испускаемых ураном (и каждым веществом, содержащим в себе уран) — способность действовать на заряженный электрометр. Электрометр — это такой прибор, в котором свисают рядом два тоненьких золотых листочка. Стоит только



хоть немножко зарядить электрометр электричеством, как листочки сейчас же начнут отталкиваться друг от друга и немедленно разойдутся врозь на некоторый угол. В таком положении они и останутся, пока с них не стечет электрический заряд. Обыкновенно электрический заряд стекает очень медленно, и проходит много часов или даже много дней перед тем как листочки снова сойдутся. Но Беккерель сделал следующий опыт: он положил в коробку электрометра, под самые листочки, свою лепешку урановой соли, и листочки стали спадать заметно быстрее, а через полтора часа и вовсе сошлись. Сделав несколько опытов, Беккерель увидел, что испускаемые ураном лучи делают воздух способным проводить электричество: поэтому с листочков электрометра заряд утекает через воздух, и листочки спадают.

Когда Беккерель напечатал подробное описание своих опытов, все физики и химики во всем мире всполошились. Лучи Беккереля произвели такую же сенсацию, какую за несколько месяцев перед тем произвели лучи Рентгена. Во всех физических лабораториях только и было разговоров, что о таинственных лучах Беккереля. Огромное впечатление произвели эти разговоры о лучах Беккереля на одну молодую польку, жившую в Париже, — Марию Склодовскую-Кюри. Склодовская-Кюри, которая в то время еще была начинающим и никому неизвестным физиком, решила расследовать — один ли только уран испускает лучи Беккереля или же есть еще и какие-нибудь другие вещества, испускающие такие же самые лучи. Для того, чтобы узнать, испускает ли какое-нибудь вещество лучи Беккереля или нет, не нужно брать фотографическую пластинку, подумала Мария Кюри: с фотографической пластинкой много возни, и работа подвигается очень медленно. Проще всего взять электрометр, как это делал и Беккерель: если по мере приближения к исследуемому веществу листочки заряженного электрометра будут спадать, значит это вещество испускает лучи Беккереля, а если нет, то, значит, никаких

лучей Беккереля оно не испускает. Вооружившись своим электрометром, Мария Кюри исследовала множество разных веществ — всевозможные минералы, горные породы, газы, растворы — вообще все, что ей удалось достать. И только в апреле 1898 года она, наконец, наткнулась на одно вещество, которое испускало лучи Беккереля как и уран. Этим веществом оказался металл торий — довольно редкий металл, который еще в 1829 году был открыт знаменитым шведским химиком Берцелиусом. Не только чистый торий испускал лучи Беккереля, но и все соединения тория с другими веществами. Как и в случае урана, здесь выполнялось такое же правило: чем больше тория, тем сильнее лучи; ни от чего другого испускание лучей Беккереля не зависело. Когда Мария Кюри увидела, что уран не единственное чистое вещество, испускающее лучи Беккереля, но что таким же свойством обладает и торий, она сочла нужным придумать для этого свойства особое название — она назвала его радиоактивностью (от латинского слова «радиус» — луч; радиоактивность — способность испускать лучи). Уран и торий — это радиоактивные вещества, — так назвала их Мария Кюри, — и все их соединения с другими веществами тоже радиоактивны.<sup>1</sup>

Продолжая свою работу с радиоактивными веществами, Мария Кюри в том же 1898 году сделала неожиданное открытие, которое поставило ее на короткое время в тупик. У нее было несколько образцов урановой смоляной обманки — руды, из которой добывают чистый металл уран. Эти образцы руды были выкопаны из земли в рудниках около чешского городка Иоахимсталъ. Когда Мария Кюри принялась исследовать электрометром эти куски руды, то обнаружилась непонятная

---

<sup>1</sup> Заметим, что радиоактивность тория и его соединений одновременно с Марией Кюри, или даже немножко раньше открыл немецкий физик Шмидт. Но дальнейшие работы Шмидта оказались менее замечательными, чем дальнейшие работы Марии Кюри, а поэтому мы здесь ограничимся рассказом об открытиях, сделанных Марией Кюри.

вещь: если взять два препарата, содержащие в себе одинаковое количество урана — но только один в виде химически чистого урана, а другой в виде куска руды из Иоахимсталля — и поднести и к тому и к другому одинаково заряженный электромметр, то оказывается, что в присутствии иоахимстальской руды листочки электромметра спадают в несколько раз быстрее, чем в присутствии химически чистого урана. Значит, иоахимстальская руда испускает гораздо больше лучей Беккереля, чем препарат, содержащий такое же количество химически чистого урана. Это казалось очень странным, потому что количество лучей Беккереля, испускаемых тем или иным препаратом урана, должно было бы, казалось, зависеть только от количества урана и ни от чего больше. Когда Мария Кюри получила в своей лаборатории этот странный результат, она рассказала о нем своему мужу, известному парижскому физику Пьеру Кюри. Пьер и Мария Кюри стали вместе думать о том, какая могла бы быть причина того, что иоахимстальская урановая руда в несколько раз более радиоактивна, чем химически чистый уран и его соединения. Подумав, они сообразили, что вероятно в иоахимстальской руде есть, кроме урана, еще какое-то другое радиоактивное вещество, испускающее лучи Беккереля: присутствие этого другого вещества, которого нет в химических препаратах урана — это и есть причина большей радиоактивности чешской руды по сравнению с чистым ураном. Что же это за вещество, подмешанное к иоахимстальской руде и дающее столько лучей Беккереля? Ясно, прежде всего, что этого вещества там очень мало, — иначе его давно заметили бы инженеры-химики, изучавшие химический состав урановой руды. А раз его там так мало и, несмотря на это, оно дает так много лучей Беккереля, значит, это должно быть какое-то еще неизвестное химикам вещество, во много раз более радиоактивное, чем уран или торий. В иоахимстальской урановой руде спрятано неизвестное новое вещество, отличающееся огромной способ-



Г-жа Кюри в своей лаборатории на улице Кювье.

ностью испускать лучи Беккереля. Вот к какому заключению пришли Пьер и Мария Кюри, и сразу же перед ними встала заманчивая задача — извлечь из иоакимстальской руды это таинственное новое вещество, которого там так мало, что обыкновенными химическими способами до тех пор никому не удалось его там обнаружить: ведь только электрометр, указавший на повышенную (по сравнению с чистым ураном) радиоактивность иоакимстальской руды, заставил это неизвестное радиоактивное вещество выдать свое присутствие.

С этого момента (в апреле 1898 года) Пьер и Мария Кюри решаются посвятить себя этой задаче — извлечению нового радиоактивного вещества из иоакимстальской руды. Пьер Кюри приостановил все другие работы, которые он вел в своей лаборатории, и присоединился к работе Марии Кюри. Первым делом нужно было получить для обработки большое количество материала, содержащего в себе это неизвестное вещество. Сама урановая руда очень дорога — и поэтому Пьер и Мария Кюри отказались от мысли получить ее в чистом виде. Но урановая руда дорога только потому, что в ней есть уран, а ведь Пьеру и Марии Кюри сам уран был не нужен, и поэтому они охотно согласились получить не уран, а то, что остается от урановой руды после того, как из нее уже извлечен уран: этот остаток и должен был, по мнению Кюри, содержать в себе таинственное новое вещество. В Иоакимстале, на заводах, где перерабатывают добытую в рудниках урановую смоляную руду, делают так: руду сперва растирают в порошок, затем размешивают с содой и тщательно промывают горячей водой, к которой подмешано немного серной кислоты. При этом соли растворяются в воде, и их затем уже добывают оттуда. Но при такой промывке порошка горячей водой не все растворяется в воде: осадок, в котором уже нет никакого урана, остается, и его просто выбрасывают (или, лучше сказать, выбрасывали в те времена, потому что теперь, после того, как Пьер и Мария Кюри

научили химиков добывать из этого осадка новые радиоактивные вещества, он ценится еще больше, чем чистый уран, а тогда он считался просто никому ненужным отбросом). Вот этот-то осадок Пьер и Мария Кюри и захотели исследовать: по их мнению в нем должно было содержаться неизвестное вещество, которому иоакхимстальская руда обязана своей повышенной радиоактивностью. Добыть это вещество из осадка было очень заманчиво: если даже ничтожная примесь этого вещества дает так много лучей Беккереля, то сколько же лучей даст само вещество, если удастся его добыть в сколько-нибудь большом количестве! Ясно, что для этого понадобится переработать в лаборатории много пудов осадка, остающегося после удаления урана из смоляной руды. Все это должно было потребовать от Пьера и Марии Кюри огромной работы, но их это не устрасило. У них не было денег, но к счастью удалось убедить известного миллионера барона Ротшильда пожертвовать несколько тысяч франков на устройство новой лаборатории; кроме того австрийское правительство (Чехия тогда принадлежала Австрии, и иоакхимстальские рудники были собственностью правительства) согласилось подарить настойчивым французским физикам целых два вагона отбросов, остающихся от урановой руды после добычи из нее урана. Все это было привезено в Париж и свалено в лаборатории, которую устроили себе супруги Кюри. Сама «лаборатория» — правду сказать — имела не очень внушительный вид: это был большой сарай на улице Ломон, неудобный и сырой, в котором было лишь самое необходимое; приборов было очень мало, вентиляции почти никакой, так что многие химические реакции, при которых выделяются вредные газы, приходилось производить на дворе. Но сколько чудесных часов провели в этом сарае Пьер и Мария Кюри, увлеченные поисками нового радиоактивного вещества!

Трудная задача предстояла Пьеру и Марии Кюри,—потруд-



нее, чем отыскать иголку в стоге сена. Здесь не удастся пересказать все те сложные и хитроумные химические способы, которые они придумывали и применяли к разделению исследуемого материала на составные части. К каждой такой составной части они подносили заряженный электрометр, чтобы узнать, испускает ли она лучи Беккереля или нет. Если нет, то они ее выбрасывали, а если да, то ее предстояло снова разделить на составные части, снова исследовать их при помощи электрометра, и так далее, и так далее, пока, наконец, таинственное вещество, за которым они так охотились, не будет выделено в чистом виде.

Очень скоро Пьер и Мария Кюри установили, что неизвестных радиоактивных веществ в исследуемом ими материале не одно, а два. Одно из них по своим химическим свойствам должно было быть похоже на висмут, потому что во всех химических реакциях куда шел висмут, туда шло и это вещество, присутствие которого было заметно по действию его лучей Беккереля на заряженный электрометр. Другое же вещество по своим химическим свойствам напоминало металл барий, потому что оно повсюду следовало за барием. Уже 18 июля 1898 года Пьер и Мария Кюри могли сообщить в Парижскую Академию Наук, что им удалось добыть из иоакимсталльской руды химический препарат с заметной примесью первого из этих двух веществ (похожего на висмут). Этому веществу они дали название **полоний** (в честь Польши — родины Марии Кюри). Полученный ими препарат полония был во много раз активнее, чем самый чистый уран. А через несколько месяцев, 26 декабря 1898 года, они послали в Академию новое сообщение: они добыли из той же руды другой препарат, в котором содержалось второе неизвестное вещество (похожее на барий). Препарат испускал лучи Беккереля в 900 раз сильнее, чем такое же количество чистого урана. Значит, в этом препарате должно было быть какое-то вещество, в огромное

число раз более радиоактивное, чем уран. Добыть это вещество по возможности в большом количестве в чистом (или по крайней мере в сильно сконцентрированном) виде — вот что стало целью жизни Пьера и Марии Кюри. Для достижения этой цели они отказались от всего на свете, просиживали в лаборатории дни и ночи за кропотливыми химическими анализами, стараясь найти способ отделить неизвестное вещество от бария, за которым оно следовало по пятам во всех химических превращениях. Нужно было как-нибудь окрестить это неизвестное вещество, за которым они охотились, и они назвали его **радием**, т. е. «лучистым веществом», в честь тех мощных потоков лучей Беккереля, которые это вещество будет испускать, когда удастся сконцентрировать его в заметном количестве.

В 1902 году, через четыре года после начала работы, Пьер и Мария Кюри получили первые несколько дециграммов чистого хлористого радия, т. е. соединения радия с хлором (на каждый грамм хлористого радия приходится 0,76 г радия и 0,24 г хлора). Несколько маленьких белых кристалликов в форме острых иголок — вот что получили Пьер и Мария Кюри после четырех лет работы, вот что они добыли из огромной груды переработанного ими иоаксимстальского осадка. Но этот хлористый радий был в миллион раз радиоактивнее, чем такое же количество чистого урана, и этим Пьер и Мария Кюри были вознаграждены за огромную проделанную ими работу.

Заметим, что обыкновенно, когда добывают радий, ограничиваются тем, что получают его не в абсолютно чистом виде, а в виде его соединения с хлором или бромом. Впрочем, Мария Кюри в 1910 году получила радий и в чистом виде, пропуская через расплавленный хлористый радий сильный электрический ток: это тот же самый, известный всем еще из школьных учебников, способ электролиза, которым можно разложить на хлор и натрий расплавленный или растворен-

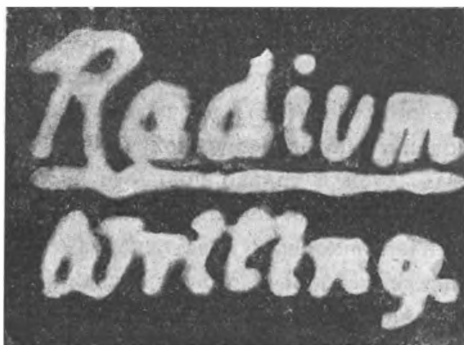
ный в воде хлористый натрий (поваренную соль). Выделенный в чистом виде радий оказался, как и следовало ожидать, блестящим белым металлом, похожим на барий или на кальций, с которыми у него есть химическое сходство. Пьер Кюри не дожил до того дня, когда радий был выделен в совершенно чистом виде: нелепый случай лишил его жизни — 19 апреля 1906 года его раздавил ломовик на улице Дофин в Париже.

В урановой смоляной руде радия очень мало: необходимо переработать много тонн руды, чтобы получить всего лишь один грамм радия. Но чудесные радиоактивные свойства радия, испускающего в миллион раз больше лучей Беккереля, чем чистый уран, оправдывают всю ту грандиозную работу, которую пришлось проделать супругам Кюри для извлечения радия из руды. В течение четырех лет, протекавших от начала работы до получения первых кристалликов хлористого радия, каждый год получались все более и более концентрированные порции радиевых препаратов, и каждый год приносил новые неожиданные открытия. Уже в самом начале работы, когда Пьер и Мария Кюри получили препарат радия, в 900 раз превосходивший своей активностью уран (в декабре 1898 года) было замечено, что лучи Беккереля, как и лучи Рентгена, не только чернят фотографическую пластинку и ускоряют спадание листочков заряженного электрометра, но и заставляют ярко светиться в темноте экран, покрытый слоем платиноцианового бария или какого-нибудь другого флюоресцирующего вещества. Это свойство лучей Беккереля впоследствии даже получило некоторое практическое применение: сернистый цинк, к которому подмешано самое крохотное количество радиоактивного вещества, светится в темноте под влиянием лучей Беккереля, испускаемых частицами этого вещества, а поэтому таким сернистым цинком с примесью радиоактивного вещества иногда рисуют цифры на циферблате часов и обмазывают стрелки, чтобы можно было ночью взглянуть на

часы, не зажигая спички. Во время мировой войны таким сернистым цинком обмазывали ружейные прицелы (чтобы ночью можно было прицеливаться в темноте), стрелки и буквы на магнитной буссоли и т. п.; это даже вызывало резкое повышение спроса и вздорожание радиоактивных веществ (о ценах радиоактивных веществ будет дальше рассказано подробнее). Фотографическое действие лучей Беккереля тоже становилось все интенсивнее и заметнее по мере того, как Пьер и Мария Кюри готовили препараты, все более и более богатые радием. Вскоре после начала работы были получены препараты столь активные, что уже не требовалось длительных экспозиций (по несколько часов), чтобы получилось заметное почернение фотографической пластинки от действия лучей Беккереля: стоило только поднести препарат, содержащий радий, на несколько секунд к завернутой в бумагу фотографической пластинке, как пластинка заметно темнела. В прекрасной книжке «Радий и его разгадка», которую написал английский химик Фредерик Содди — один из первых исследователей радиоактивности (о его работах будет подробно рассказано дальше), — описывается следующий опыт: берется стеклянная трубочка, в которую помещен препарат, содержащий в себе немножко радия, и этой трубочкой медленно водят, выписывая какое-нибудь слово, как карандашом, по фотографической пластинке, завернутой в черную бумагу, защищающую ее от всех видимых лучей света. После того, как пластинка проявлена, на ней оказывается написанным это слово. Вот как быстро лучи Беккереля зачернили те места пластинки, к которым была поднесена трубочка с препаратом радия! (см. фото на стр. 26 и 27).

В самых первых опытах над препаратами радия было замечено, что вещество, содержащее радий, всегда немножко теплее, чем все окружающие предметы. Пьер Кюри решил воспользоваться этим для того, чтобы измерить энергию лучей Беккереля, испускаемых радием. В самом деле, эти

лучи Беккереля, которые чернят фотографическую пластинку, делают воздух проводником электричества, заставляют флюоресцирующие экраны светиться, — должны же эти лучи Беккереля иметь какую-то энергию для того, чтобы делать все это! Пьер Кюри взял калориметр — прибор, в котором по количеству растаявшего в нем льда определяется, сколько выделилось в приборе тепла — и поместил туда препарат радия. Калориметр был взят такой,

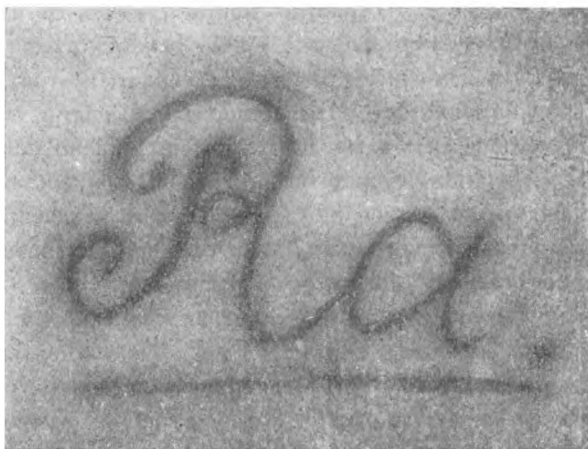


Надпись, сделанная на фотографической пластинке стеклянной трубочкой с препаратом радия. (Содди).

что все лучи Беккереля, которые испускал препарат, не могли выходить из прибора: все они, как говорят, «поглощались» в массе льда и в толстых стенках калориметра. Взвесив растаявший лед и зная, сколько требуется тепла для того, чтобы расплавить это коли-

чество льда, Пьер Кюри сумел измерить количество теплоты, выделяемое препаратом радия. Оказалось, что каждый грамм радия в течение часа выделяет из себя 140 малых калорий энергии (малая калория — это та энергия, которая нужна, чтобы поднять температуру одного грамма воды на один градус Цельсия). Энергия, отдаваемая радием, уходит с лучами Беккереля, но если эти лучи задержать, поглотить их, как было сделано в опыте Пьера Кюри с калориметром, то та же самая энергия выделяется в виде теплоты. 140 малых калорий в час! Эта энергия, выделяемая граммом радия, не очень велика: целых 50 часов должно пройти для того, чтобы грамм радия отдал столько же энергии, сколько отдает,

сгорая, один грамм угля. Но зато грамм угля, сгорев, превратившись в углекислый газ, уже перестает отдавать энергию дальше, а грамм радия, отдав, хотя и очень медленно, — в течение 50 часов, — то же самое количество малых калорий, остается, повидимому, таким же, каким он был, и продолжает



Негатив, полученный при „писании“ стеклянной трубочкой с несколькими миллиграммами чистого бромистого радия по фотографической пластинке, завернутой в черную бумагу. (Содди).

испускать энергию тем же самым темпом. Вот эта-то способность радия испускать, хотя и очень медленно, большие и, повидимому, совершенно неограниченные количества энергии должна была больше всего заинтересовать физиков: она и дала возможность говорить о загадке радия, о загадке радиоактивности, мучительной загадке, заставлявшей физиков 1900 года ломать себе голову над таинственными свойствами радия и его лучей. Что является причиной радиоактивных явлений? Что заставляет радиоактивные вещества испускать лучи Беккереля? Какова природа



этих лучей, так похожих (на первый взгляд) на лучи Рентгена? Откуда радиоактивные вещества берут энергию, которую они затем отдают внешнему миру в форме энергии своих таинственных лучей? И действительно ли эта энергия неисчерпаема? Действительно ли кусочек радия представляет собой нечто вроде «перпетуум мобиле» — вечного двигателя, о котором так страстно мечтали когда-то изобретатели, — двигателя, который все время может отдавать миру энергию, хотя в нем самом ничего не сгорает, не тратится, не портится, не изменяется? Или, может быть, радий совсем не является исключением в мире, где все подчинено закону сохранения энергии, и, может быть, запасы энергии, содержащейся в радии, хотя и велики, но совсем не неисчерпаемы, и если через 50 часов в грамме радия еще не заметно никакого иссякания, увядания, упадка, то через много недель или даже только через много лет уменьшение запасов энергии в радии должно стать заметным. Вот какие вопросы волновали физиков, изучавших радий, вот какие вопросы составляют содержание загадки радиоактивности, о которой говорит заглавие этой главы нашей книжки. В дальнейших главах мы узнаем, как была разгадана загадка радия и к каким огромным по своему значению последствиям привела разгадка этой загадки, позволившая физикам необыкновенно глубоко заглянуть в самые сокровенные тайны окружающего нас мира. Но перед тем как приступить к рассказу о разгадке радия, нужно будет хотя бы вкратце рассказать о том, в каком состоянии находилась физика того времени, когда загадка радия была поставлена и привлекла к себе всеобщее внимание; нужно будет рассказать о том, что физики знали вообще об устройстве вещества, когда им пришлось заняться более узким и специальным вопросом — вопросом об устройстве радиоактивного вещества. Этому мы посвятим две следующие главы (главу II, Атомы, и главу III, Электроны и рентгеновские лучи). В этих главах мы расскажем все то, что уже могли

знать физики, которым предстояло разгадывать загадку радиоактивности — все, что физики знали об устройстве вещества до 1902 года (год, когда Пьер и Мария Кюри выделили хлористый радий) и в течение нескольких следующих лет. Но еще перед тем, как погрузиться в эти трудные и важные главы, мы расскажем еще об одном удивительном свойстве радия — свойстве, которое привлекло к нему внимание не только физиков, но и самой широкой публики, и вызвало к жизни великое множество практически важных последствий.

3 апреля 1901 года Анри Беккерель зашел в лабораторию Пьера Кюри и просил у него разрешения взять на время препарат радия (Анри Беккерель собирался в этот день прочитать студентам лекцию о радиоактивности, и препарат радия ему нужен был для того, чтобы показать слушателям несколько опытов). Пьер Кюри дал ему стеклянную трубочку, в которой было немного (меньше 1 гр) добытого из иоакимсталевской руды вещества с большой примесью радия. Трубочка была завернута в бумагу и положена в картонную коробку. Эту коробку Беккерель небрежно засунул в жилетный карман, и она пролежала в кармане около шести часов. Лучи Беккереля, испускавшиеся этим препаратом, были так сильны, что когда Беккерель в пальто вошел в темную комнату, в которой был экран с платиноциановым барием, и подошел к экрану, экран начал очень сильно светиться: лучи свободно проходили сквозь пальто, и даже когда экран подносили к спине Беккереля прямо против жилетного кармана, где была трубочка с препаратом радия, экран слегка светился под действием лучей, прошедших насквозь через грудную клетку Анри Беккереля.

Через 10 дней, 13 апреля, Беккерель обнаружил у себя на груди, как раз на том месте, где был жилетный карман, маленькое красное пятнышко. Боли не было никакой. Потом пятнышко начало расти, сделалось более темным, а через несколько дней оно приняло такую же форму и такие размеры,

как стеклянная трубочка, в которой был радий. Еще через несколько дней Беккерель почувствовал сильную боль. Кожа растрескалась, образовалась язва, и Беккерель в ужасе обратился к врачу. Врач принялся лечить эту язву, как лечат обыкновенный ожог, и приблизительно через месяц язва закрылась и зарубцевалась. Но еще через два года после этого происшествия на груди Беккереля был виден отчетливый белый шрам в том месте, где раньше была эта ранка.

Когда Пьер Кюри узнал о происшествии с Беккерелем, он принялся нарочно делать вот какие опыты: один раз он привязал к своей руке препарат радия на десять часов. Через некоторое время у Кюри, как прежде у Беккереля, появилась краснота, началось воспаление, а через несколько дней открылась ранка. Она очень сильно болела и прошла только после четырех месяцев лечения; на коже, как и у Беккереля, остался глубокий белый шрам. Другой раз Пьер Кюри попробовал поносить в кармане крупинку радия полчаса; через 16 дней на коже образовался ожог, затем вскочил волдырь, который прошел только через две недели.

Обо всем этом Пьер Кюри рассказал парижскому доктору Данло, работавшему в госпитале Сен-Луи. Доктор Данло сразу сообразил, что если радий так сильно действует на человеческую кожу, то это должно оказаться очень важным для медицины. Ведь все врачи очень хорошо знают, что действие лекарств сильно зависит от дозы: если какое-нибудь лекарство благотворно действует на больного, когда его применяют в маленькой дозе, то в большой дозе оно может оказаться сильным ядом, способным отправить на тот свет и здорового. Не окажутся ли лучи радия, которые так вредны в большой дозе, хорошим лекарством для кожи, если их применять в маленькой дозе? Доктор Данло очень осторожно попробовал действовать слабенькими порциями лучей радия сначала на животных, потом на людей. Оказалось, что в маленьких дозах лучи радия хорошо изле-

чивают экзему, лишай, волчанку и всякие другие болезни кожи. Опытами доктора Данло заинтересовались многие врачи и биологи, и с тех пор медицинские действия лучей радия были очень хорошо изучены в клиниках и в биологических лабораториях. Врачи скоро заметили, что сильные лучи радия, разрушая клетки и ткани человеческого тела, не на все клетки и не на все ткани действуют одинаково: те клетки, которые обладают способностью очень быстро размножаться, гораздо сильнее страдают от разрушительного действия лучей радия, чем медленно размножающиеся клетки. Это открытие оказалось очень важным, и вот почему: существует такая болезнь — рак: это очень мучительная болезнь, от которой погибает множество людей и которая прежде считалась совершенно неизлечимой. У больного раком образуется в каком-нибудь месте тела (на коже или во внутренних органах, например в гортани, в желудке) раковая опухоль, очень быстро разрастающаяся и заражающая весь организм больного теми частицами, которые она рассылает во все органы его тела. Клетки, из которых состоит раковая опухоль, размножаются очень быстро: гораздо быстрее, чем те клетки, из которых состоят здоровые ткани. А так как лучи радия тем сильнее разрушают ткань, чем быстрее размножаются ее клетки, то вывод ясен: необходимо воздействовать на раковую опухоль лучами радия, и эти лучи уничтожат, разрушат, съедят опухоль, оставив окружающие здоровые ткани почти невредимыми. Такой способ лечения рака врачи стали применять уже через несколько лет после открытия радия, и этот способ давал прекрасные результаты. Лечение производится так: препарат радия помещают в золотой футляр и прикладывают к раковой опухоли. Если только болезнь не слишком запущена, т. е. если микроскопические кусочки опухоли еще не успел разнестись (по кровеносным и лимфатическим сосудам) по всему телу больного, то лечение обыкновенно очень хорошо удастся. Плохо оно удастся только в тех случаях,

когда раковая опухоль растет очень глубоко внутри тела, например, в желудке. Опухоль на коже уничтожается при достаточно энергичном лечении очень быстро — недели в две.

Когда врачи стали лечить лучами радия разные болезни, то на радий сейчас же появился спрос. Все крупные больницы обязательно захотели иметь у себя хотя бы крупинку этого вещества для того, чтобы излечивать кожные болезни. Но радий доставать было очень трудно. Немецкий физик Гизель, скоро после того, как Пьер и Мария Кюри открыли радий, достал из Иоахимсталя большое количество тех же остатков от переработки урановой смоляной руды, которыми пользовались и супруги Кюри, и начал добывать из них радий, применяя те же самые способы. После этого он очень великодушно разослал весь добытый им радий всем физикам, которые занимались изучением лучей Беккереля и решали или пробовали решать загадку радиоактивности. Австрийское правительство очень скоро сообразило, что отбросы от переработки урановой смоляной руды теперь будут цениться дороже самого урана и, просто-на-просто, запретило вывозить эти отбросы за границу. Это подняло цены на радий до таких пределов, что даже те физики, которые больше всего сделали для открытия и добычи радия (Пьер и Мария Кюри, Гизель), потеряли всякую возможность его покупать. Когда через несколько лет после открытия радия английским физикам понадобилось крохотное количество радия для научной работы, они вынуждены были использовать очень сложную протекцию: обратились к принцу Уэльскому (наследнику английского престола), и он воспользовался своими знакомствами и связями при дворе австрийского императора, чтобы получить разрешение вывезти из Австрии некоторое количество остатков от переработки урановой смоляной руды.

В 1912 году парижский университет совместно с знаменитым медицинским институтом Пастера организовал в Париже так называемый Институт Радия. Этот институт открылся на

улице, которая была названа именем Пьера Кюри, а мадам Кюри получила должность директора этого Института, которую она сохранила до самой своей смерти (в 1934 году). В этом Институте производятся важные физические исследования, относящиеся к свойствам радиоактивных веществ и их лучей, но кроме того еще и производится лечение больных. В 1918 году Мария Кюри подарила клинике своего Института грамм радия, извлеченный ею и ее мужем из иоакимстальской руды и представлявший ее личную собственность; в то время, когда был сделан этот подарок, грамм радия стоил сто тысяч долларов (полтора миллиона франков).

Практические применения радия в медицине вызвали необходимость добывать заводским путем значительные количества радия. В 1914 году правительство Соединенных Штатов организовало завод для добычи радия из так называемых карнотитовых руд, которые встречаются в разных местах Соединенных Штатов и содержат в себе уран и радий. В 1921 году в местечке Хатанга (бельгийские владения в Центральной Африке) были открыты богатые залежи урановой смоляной руды. Оказалось, что в этой руде есть довольно значительная примесь радия. Поэтому в 1923 году, в местечке Оолен вблизи бельгийского города Антверпен, был построен радиевый завод, куда привозят урановую смоляную руду, добытую в Хатанге, и извлекают из нее радий. В течение месяца на этом заводе добывают четыре грамма радия. Способ добычи, в основном, такой же, как тот, который применяли Пьер и Мария Кюри в своих первых лабораториях на улице Ломон и на улице Кювье. Этот способ очень сложен; для интересующихся мы приводим цитату из «Курса общей химии» проф. Б. Н. Меншуткина (4-е издание, Ленинград, 1933):

«Переработка урановой смолки в Оолен ведется так: действием серной и азотной кислот извлекают из руды соединения урана, затем после удаления кремнезема обрабатывают

соляную кислоту и (после прибавления необходимого количества солей бария) полученные сернокислые соли бария и радия отфильтровывают и под давлением нагревают с раствором соды для перевода сернокислых солей бария и радия в углекислые; их растворяют в чистой соляной кислоте и снова осаждают раствором угленатриевой соли. Полученные чистые углекислые соли действием чистой же соляной кислоты переводят в хлористые барий и радий, готовят почти насыщенный при  $100^{\circ}$  раствор последних и охлаждают его; при дробной кристаллизации сперва осаждается труднее растворимый хлористый радий, потом уже хлористый барий. Поэтому отдельно собирают первые порции кристаллов и последующие. С маточным рассолом и этими кристаллами повторяют много раз такую перекристаллизацию, пока не получится хлористый барий со значительным содержанием хлористого радия. Тогда раствор их осаждают углекислой солью аммония, полученный осадок промывают, растворяют в бромоводородной кислоте и получают еще более различающиеся растворимостью в воде бромистые барий и радий. Их снова подвергают дробной перекристаллизации вплоть до получения чистого бромистого радия, который запаивают в стеклянные трубочки, помещенные в толстые свинцовые футляры, и сохраняют в отдаленном от жилья помещении».

Во всем мире теперь добыто около семисот граммов радия. Это вещество дороже золота и платины во много раз.

У нас в СССР до недавнего времени радий добывался из урановых руд, залежи которых есть в Фергане (в Средней Азии). В наших физических и медицинских институтах имеется в общей сложности около полутора десятка граммов радия. Но потребность в ради у нас очень велика: для успешной борьбы с раковыми заболеваниями необходимо иметь в СССР по крайней мере 100 г радия. Недавно в разных местах СССР (в наших полярных районах и в Туркестане) найдены источники, в воде которых растворены радиоактив-

ные вещества. Добывать радий из этих вод гораздо удобнее и выгоднее, чем из урановых руд в Фергане. Поэтому теперь вся наша добыча радия уже ведется по новому: радий извлекают из воды радиоактивных источников. В течение нескольких лет мы добудем нужное количество радия для наших больниц и научных учреждений.



## *Глава вторая*

### АТОМЫ

**Ф**изические явления, происходящие в окружающем нас мире, представляют бесконечную цепь загадок. Вода, охлаждаясь, превращается в твердый, бесцветный лед, нагреваясь же, становится невидимым водяным паром. Если ее слегка подкислить серной кислотой и пропускать через нее электрический ток, она постепенно превращается в два газа — водород и кислород. Стоит только смешать эти газы и поджечь их искрой, как они со взрывом снова превращаются в воду. Блестящее железо в сыром воздухе превращается в ржавчину. Горящий уголь становится углекислым газом. Подлинно, «природа находит удовольствие во всевозможных превращениях», как когда-то сказал знаменитый английский ученый Исаак Ньютон. И все эти превращения ставят перед нами все тот же вопрос: в чем заключается интимная внутренняя сторона всех этих явлений, которые мы воспринимаем как холод, как тепло, как пламя, как взрыв и т. д. Каков закулисный механизм всех этих театральных эффектов, которые мы все время наблюдаем и которые изучает физика и химия? С давних пор люди стремились получить ответ на этот вопрос. И еще перед тем, как наука доросла до того, чтобы суметь ответить на этот вопрос правильно, нетерпеливые философы пытались ответить на него, заменив строгое исследование простой догадкой.

В глубокой древности, больше, чем 2000 лет тому назад

(в 5-м столетии до начала нашего летоисчисления), греческие философы Демокрит Абдерский и Лейкипп высказали замечательную догадку, которой впоследствии было суждено сыграть огромную роль в истории научного понимания мира. Демокрит и Лейкипп утверждали, что все вещи в мире состоят из ничтожно малых, невидимых глазу по причине своей малости, частиц. Эти частицы уже не могут быть разрезаны на дальнейшие части, они являются последними и самыми основными частицами всего существующего на свете; поэтому они получили название атомов (по-гречески «атомос» значит неделимое, — то, что не может быть разрезано или разорвано). Все существующие в мире тела суть комбинации атомов. Но в том роде атомов, которым является каждое тело окружающего нас мира, мы не видим отдельных атомов подобно тому, как в роде пчел мы издали не видим отдельных пчел: все пчелы сливаются для нас в одну сплошную тучу. Все явления, происходящие на свете, заключаются лишь в том, что атомы движутся в пространстве, образуют друг с другом разные комбинации, затем эти комбинации распадаются, возникают новые и т. д. Мы можем видеть пламя, ощущать холод, тепло, слышать звук и т. д., но все это лишь внешняя видимость вещей, воспринимаемая нашими несовершенными органами чувств, а на самом деле (с той самой внутренней закулисной стороны, о которой мы говорили раньше) происходит одно только движение атомов, их перемещение в пространстве, разрушение и возникновение все новых и новых построек из того же самого вечного материала — атомов.

В этом и заключалось учение Лейкиппа и Демокрита. Хотя оно было основано на простой догадке и не было подкреплено серьезными доказательствами, тем не менее оно получило широкое распространение уже в глубокой древности. Учение о том, что все тела природы состоят из атомов разной величины и разной формы, было особенно развито Эпикуром (300 лет до начала нашего летоисчисления) и Лукрецием

(в I веке до начала нашего летоисчисления). Не только греческо-римская цивилизация создала это учение, но и индийская: современник Лукреция индийский философ Канада учил, что тела состоят из атомов, отличающихся друг от друга различными свойствами. Мельчайшая пылинка солнечного луча, — так учил Канада, — состоит из шести атомов, из которых каждые два «волей бога или еще чем-нибудь» соединены в двойные атомы. Четыре пылинки солнечного луча образуют следующую по сложности частицу, — с восхитительной наглостью продолжает Канада (как будто он мог обо всем этом хоть что-нибудь знать!). Так, смешанная с фантастическими и грубо ошибочными рассуждениями, создавалась атомистическая теория, — одна из наиболее глубоких и важных теорий строения вещества.

В средние века атомистическая теория имела сравнительно мало сторонников. Но в XVII веке, когда наука стала огромными шагами идти вперед, когда появилась научная механика и начала появляться научная химия, атомистическая теория снова стала распространяться среди физиков и философов. Вот что говорит об атомах Исаак Ньютон (приводим в точном переводе этот отрывок, чрезвычайно характерный для науки XVII столетия): «Мне представляется, что бог с самого начала сотворил вещество в виде твердых, весомых, непроницаемых, подвижных частиц, и что этим частицам он придал такие размеры и такую форму и такие другие свойства и создал их в таких относительных количествах, как ему нужно было для той цели, для которой он их сотворил. Эти первичные частицы абсолютно тверды: они неизмеримо более тверды, чем те тела, которые из них состоят, — настолько тверды, что они никогда не изнашиваются и не разбиваются вдребезги, так как нет такой силы, которая могла бы разделить на части то, что сам бог создал нераздельным и целым в первый день творения. Именно потому, что сами частицы остаются целыми и неизменными, они могут образовать тела,

обладающие той же самой природой и тем же строением во веки веков; ведь если бы частицы изнашивались или разбивались на части, то зависящая от них природа вещей изменилась бы. Вода и земля, составленные из старых изношенных частиц и осколков, отличались бы по строению и свойствам от воды и земли, построенных из еще целых частиц в начале творения. Поэтому, для того, чтобы природа могла быть долговечной, все изменения тел природы могут заключаться лишь в перемене расположения, в образовании новых комбинаций и в движении этих вечных частиц... Бог мог создать частицы вещества, обладающие разными размерами и разной формой, поместить их на разных расстояниях друг от друга, наделить их, быть может, разными плотностями и разными действующими силами. Во всем этом я, по крайней мере, не вижу никаких внутренних противоречий... Итак, повидимому все тела были построены из вышеупомянутых твердых непроницаемых частиц, которые были в первый день творения размещены в пространстве по указанию божественного разума.

В 1661 году англичанин Роберт Бойль опубликовал книгу под заглавием «Скептический химик». В этой книге он дал необыкновенно ясный анализ атомистической теории с точки зрения химии. Атомы, учил Роберт Бойль, бывают различных сортов; все тела, построенные из атомов одного и того же сорта, являются «простыми телами» (теперь говорят — химическими элементами). Атомы могут, соединяясь друг с другом, образовывать более сложные частицы. Если какое-нибудь тело состоит из одинаковых частиц, каждая из которых есть комбинация нескольких атомов разного сорта, то такое тело, по Бойлю, является «совершенной смесью» (теперь принято говорить — химическим соединением). Всякая «совершенная смесь» может быть разложена на «простые тела», из которых она состоит. Однако, скудные химические познания XVII века не дали Бойлю возможности установить, какие из окружающих нас тел являются «совершенными

смесями», а какие — «простыми телами». Он даже склонен был допустить, что единственным известным «простым телом» является вода, а что все другие вещества — в том числе железо, медь, золото, серебро, свинец, ртуть — это «совершенные смеси». В этом Бойль заблуждался, и больше столетия понадобилось для того, чтобы выяснить какие тела являются сложными, т. е. «смесями», а какие — простыми.

В 1808 году в Лондоне вышел первый том книги «Новая система химической философии», написанной Джоном Далтоном, учителем в Манчестере. В этой книге Дальтон, по существу, повторяет взгляды Бойля, но какая огромная разница между книгой Бойля и Дальтона! Не будем забывать, что между выходом этих двух книг прошло 147 лет и что в течение этих лет в химии появился Лавуазье. Уже было известно, что водород, кислород, азот, углерод, сера, фосфор, натрий и калий (открыты Деви в 1807 году), кальций, стронций, барий и магний (открыты тем же Деви в 1808 году), железо, цинк, медь, свинец, серебро, платина, золото и ртуть являются простыми телами, а вода, аммиак, углекислый газ и многие другие — сложными. Уже в химии употреблялись весы, и целый ряд количественных анализов сложных веществ уже был произведен. Поэтому Джон Дальтон и мог поставить перед собой смелую задачу: определить относительные веса всевозможных атомов.

Водород — простое тело, рассуждал Дальтон, значит водород состоит из атомов одного и того же сорта — атомов водорода. Обозначим атом водорода значком  $\odot$ . Кислород — тоже простое тело, значит кислород состоит из атомов кислорода. Введем для них значок  $\bigcirc$ . Вода — это химическое соединение («совершенная смесь», как сказал бы Роберт Бойль); значит она состоит из каких-то частиц, каждая из которых представляет комбинацию определенного числа водородных атомов с определенным числом кислородных атомов. Такую частицу, состоящую из нескольких сцепленных друг

с другим атомом, Джон Дальтон называл «сложным атомом»; теперешние химики предпочитают употреблять слово молекула, которым и мы будем все время пользоваться. Итак, вода или водяной пар состоит из молекул воды. Каждая молекула воды, как решил Дальтон, руководившийся при этом «принципом простоты», состоит из двух атомов — атома водорода и атома кислорода. Молекула воды, по Дальтону, имеет вот какой вид:  $\bigcirc\bigcirc$ .

Отсюда легко заключить во сколько раз атом кислорода тяжелее, чем атом водорода. Каждый фунт воды — как гласили химические анализы, произведенные самим Дальтоном и другими современными ему химиками — состоит из  $\frac{1}{8}$  фунта водорода и из  $\frac{7}{8}$  фунта кислорода. А так как все молекулы воды совершенно одинаковы, то значит и в каждой молекуле воды  $\frac{1}{8}$  часть ее веса — это вес атома водорода, а остальные  $\frac{7}{8}$  ее веса — это вес атома кислорода. Отсюда следует, что атом кислорода весит в 7 раз больше атома водорода. Если взять вес атома водорода за единицу, то вес атома кислорода будет равен семи.

Таким же образом Дальтон определил и во сколько раз атом азота, который он обозначил значком  $\bigcirc\bigcirc$ , весит больше атома водорода  $\bigcirc$ . Для этого он воспользовался химическим анализом газа аммиака, который является химическим соединением азота и водорода. Руководясь тем же самым принципом простоты, Дальтон предположил, что молекула аммиака состоит из одного атома водорода и одного атома азота, т. е. имеет вид  $\bigcirc\bigcirc\bigcirc$ .

Анализы аммиака гласили, что каждый фунт аммиака состоит из  $\frac{1}{8}$  фунта водорода и  $\frac{5}{8}$  фунта азота. Применяя такое же самое рассуждение как раньше, легко заключить, что атом азота должен быть в пять раз тяжелее, чем атом водорода. Если попрежнему считать вес атома водорода единицей, то вес атома азота окажется, по Дальтону, равным пяти.

Большим испытанием для атомистической теории оказался

случай углерода. Углерод образует с кислородом не одно, а целых два различных соединения: в одном из них (окись углерода) на заданное количество углерода приходится сравнительно мало кислорода, а в другом (углекислый газ) — гораздо больше.

Поэтому молекулу окиси углерода Дальтон предложил рисовать в виде  $\bigcirc\bullet$ , где значок  $\bullet$  обозначает атом углерода, а молекулу углекислого газа, в которой кислорода больше, он предложил рисовать так:  $\bigcirc\bigcirc\bullet$ . Иными словами, по Дальтону, молекула углекислого газа состоит из трех атомов (двух кислородных и одного углеродного), а молекула окиси углерода из двух атомов — кислородного и углеродного. Химический анализ углекислого газа показал, что фунт углекислого газа состоит из  $\frac{5}{19}$  фунта углерода и  $\frac{14}{19}$  фунта кислорода. Так как такое же самое соотношение должно быть и в весе каждой отдельной молекулы углекислого газа, то значит вес атома углерода равен  $\frac{5}{14}$  частям веса двух атомов кислорода, т. е. он равен  $\frac{5}{7}$  веса одного кислородного атома. Сохраняя ту же условную единицу (вес атома водорода равен единице веса) и зная, что в этих отношениях вес атома кислорода равен 7, мы найдем, что вес атома углерода должен быть равен 5.

До сих пор мы еще нигде не имели повода проверить правильность этих взглядов, сделав из них какой-нибудь вывод, который можно было бы уже затем сравнить с опытом. Но теперь такая возможность представляется: если верно, то что мы говорили о весах атомов углерода и кислорода, то в окиси углерода, молекула которой имеет вид  $\bigcirc\bullet$ , отношение веса кислорода к весу углерода должно быть 7 : 5. Так и оказалось; опыт показал, что из 7 фунтов кислорода и 5 фунтов углерода получается 12 фунтов окиси углерода. Таким образом взгляды Дальтона получили блестящее количественное подтверждение. Следует, впрочем сказать, что химические анализы Дальтона были довольно неточны и

ТАБЛИЦА ХИМИЧЕСКИХ  
СИМВОЛОВ И АТОМНЫХ  
ВЕСОВ ПО ДАЛЬТОНУ (1808 г.)

Водород		1
Азот		5
Углерод		5
Кислород		7
Фосфор		9
Сера		13
Магний		20
Кальций		23
Натрий		28
Калий		42
Стронций		46
Барий		68
Железо		38
Цинк		56
Медь		56
Свинец		95
Серебро		100
Платина		100
Золото		140
Ртуть		167

цифры количественного состава химических соединений, которые были здесь приведены, несколько отличаются от правильных. Тем не менее Дальтон, несмотря на грубость своих анализов, был совершенно убежден в правильности атомистической гипотезы.

Один биограф Дальтона говорит о нем так: «Дальтон был атомист до мозга костей. Он был глубоко убежден в правильности взглядов Ньютона. Для него его атомы — «твердые, непроницаемые, подвижные» — были такой же реальностью, как если бы он видел их собственными глазами и трогал руками. В своем воображении он видел в воздухе атомы кислорода, азота и водяного пара. Он рисовал их на бумаге».

Приведем из книги Дальтона значки, обозначающие атомы разных химических элементов, и их атомные веса (см. таблицу; единицей веса попрежнему считается атом водорода).

Таковы те первичные частицы, те атомы, те «кирпичи мироздания», из которых, по Дальтону, состоят все тела на свете.

Комбинация из нескольких атомов образует молекулу («сложный атом», как говорил Дальтон); сложные тела состоят из одина-






ковых молекул — такие тела являются химическими соединениями, например вода или аммиак, и их состав в процентах может быть легко вычислен, если знать состав молекулы (например  $\bigcirc$  в случае воды и  $\bigcirc\bullet\bigcirc$  в случае углекислого газа) и относительные веса атомов, входящих в молекулу; или же сложные тела состоят из разных молекул — такие тела являются не химическими соединениями, а смесями, например воздух представляет смесь молекул кислорода с молекулами азота и с небольшим количеством молекул воды и углекислого газа. Химические реакции по Дальтону заключаются в том, что атомы вступают друг с другом в разные комбинации, образуя «сложные атомы» (молекулы), затем эти молекулы распадаются, образуются новые молекулы и т. д., подобно тому как танцоры, переходя от одного танца к другому, образуют новые комбинации. Но сами атомы при этом остаются неизменными и вечными: меняется только их распределение. «Каждая частица воды, — говорит Дальтон в своей «Химической философии», — в точности похожа на любую другую частицу воды; каждая частица водорода в точности похожа на любую другую частицу водорода и т. д. Химическое разложение и химическое соединение означают лишь то, что атомы удаляются друг от друга или же снова сцепляются вместе. Но химик неспособен уничтожить материю или создать ее вновь. Пытаться создать или уничтожить хотя бы один атом водорода так же безнадежно, как пытаться прибавить еще одну планету к солнечной системе или уничтожить какую-нибудь из существующих планет. Все, что мы можем сделать, — это разъединить атомы, соединившиеся или сцепившиеся друг с другом, или же соединить те атомы, которые сейчас находятся на большом расстоянии друг от друга».

«Химическая философия», изложенная в этих строках Дальтона, действительно стала философией целого ряда поколений химиков и физиков. Невозможность создания хотя бы одного нового атома данного химического элемента, невоз-

возможность превращения одних атомов в другие — все это было необходимым выводом из всего огромного опытного материала, на котором основывалась научная химия. Когда-то, в средние века, химики — тогда они назывались алхимиками — поставили своей целью искусственное приготовление золота; но это невозможно, как следует из химической философии Джона Дальтона, потому что ведь золото — это химический элемент, и значит невозможно ни создать, ни разрушить хотя бы один единственный атом  $\text{G}$ : можно только, лишь извлечь золото из какого-нибудь химического соединения, в котором оно уже находится, но невозможно создать новое золото из свинца или из ртути. И в самом деле, разве из всех стараний алхимиков хоть что-нибудь вышло? Получить золото из свинца или ртути им так и не удалось. И химическая философия Дальтона раз и навсегда ставила крест над попытками алхимиков: эти попытки были обречены на неудачу, потому что атомы вечны и неразрушимы.

В этом пункте Дальтон не совсем сходил с Бойлем, который в 1661 году писал, что хотя атомы остаются неизменными при всех химических явлениях, но тем не менее когда-нибудь будет найден некий «сильный и тонкий агент», с помощью которого удастся разбить атомы на более мелкие части и превратить одни атомы в другие. Эта мысль Бойля казалась Дальтону чистой фантазией: ни один химический факт не указывал на то, что атомы возможно разбивать на части и превращать друг в друга. Впрочем, в 1816 году неожиданно нашлся один сторонник этой мысли Роберта Бойля, пытавшийся подтвердить ее фактами. Это был лондонский вольнопрактикующий врач Вильям Праут, который напечатал в журнале «Философские анналы» (*Annals of Philosophy*) статью, где обращал особенное внимание на тот факт, что все атомные веса, которые определил Дальтон и которые приведены в его «Химической философии», выражаются целыми

числами. Это — очень замечательный факт, — говорил Праут, — ведь если бы атомы всех химических элементов были первичными основными частицами, подлинными «кирпичами мироздания», неразложимыми на части и нисколько не связанными друг с другом, то какая могла бы быть причина того, что атом азота ровно в пять раз тяжелее атома водорода, а кислородный атом ровно в семь раз? Праут предложил совсем другой взгляд на атомы, нисколько не противоречащий химическим опытам, но вместе с тем объясняющий и тот замечательный факт, что все атомные веса (измеренные в предположении, что вес атома водорода принят за единицу) оказались целыми числами. Мнение Праута вот какое: атом азота, который, по Дальтону, весит ровно в пять раз больше атома водорода, — это и есть пять атомов водорода, очень тесно сцепленных друг с другом; атом кислорода — это семь атомов водорода, тесно сцепленных друг с другом; атом ртути — это 167 тесно прижавшихся друг к другу водородных атомов и т. д. Выходит, что все на свете состоит, в конечном счете, из водорода. А чем же объяснить, что все-таки в химических опытах никак не удастся, например, разложить кислород на водород? Очень просто, — отвечает Праут, — все дело в том, что когда семь атомов водорода сцепляются, чтобы образовать атом кислорода, то они сцепляются гораздо теснее, чем тогда, когда, например, атом водорода и атом кислорода сцепляются, чтобы образовать молекулу воды. Поэтому-то в химических опытах и удастся разложить молекулу воды на атом водорода и атом кислорода, но никак не удастся разложить атом кислорода на семь атомов водорода, т. е. удастся разложить воду на водород и кислород, но не удастся превратить кислород в водород. Атомы всех веществ, кроме водорода, по мнению Праута — это такие же молекулы, но только гораздо более прочные и тесно сцепившиеся, а поэтому, действуя обыкновенными химическими способами, не удастся их разложить. Но что будет, если когда-нибудь будет найден

«тонкий и сильный агент», о котором мечтал Роберт Бойль? Ведь с его помощью возможно будет превращать элементы друг в друга и даже, если угодно, осуществить идеал алхимии — получение золота: например (см. таблицу Дальтона) разбить атом  на один атом  и двадцать семь атомов , т. е. разложить ртуть на золото и водород.

Статья Праута была очень убедительна, — многие поверили в то, что водород есть действительно «первичное вещество», из которого состоит все на свете. Одна только была беда — те химические анализы, основываясь на которых Дальтон вычислил свои атомные веса, были очень уж неточны: Дальтон был, правду сказать, плохой экспериментатор. Если произвести анализы тщательнее и вычислить атомные веса точнее, то окажутся ли они попрежнему целыми числами?

За грандиозную работу точного определения атомных весов и точного анализа состава химических соединений взялся знаменитый шведский химик Иенс-Якоб Берцелиус. Берцелиусу, больше чем кому-нибудь другому, химия обязана тем, что она стала точной наукой. Берцелиус был убежденнейшим сторонником атомистической теории Дальтона, которую он называл «одним из величайших успехов химии». Но в других отношениях он многого не мог простить Дальтону. «Следует упрекнуть Дальтона в том, — писал Берцелиус, — что он чересчур доверял своей собственной гипотезе и мало подвергал ее экспериментальной проверке. Можно подумать, что даже в тех немногочисленных химических анализах, которые производил Дальтон, он руководствовался желанием получить определенный результат, а ведь такого способа действий всегда нужно остерегаться, — особенно, если цель опытов — получить решающее доказательство в пользу или против какого-нибудь предвзятого теоретического мнения». И Берцелиус вооружился самой точной химической аппаратурой, какую только он мог достать или построить, и принялся за свои анализы. В течение

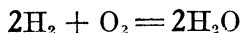
своей жизни Берцелиус проанализировал больше двух тысяч различных химических соединений, и результаты его анализов отличаются от самых точных теперешних результатов не больше, чем на 1—2% (попутно Берцелиус открыл и несколько химических элементов, до него неизвестных: селен, кремний, циркон, торий, тантал). Вычисляя атомные веса, Берцелиус никогда не определял состав молекулы анализируемого вещества наугад, как это делал Дальтон, предположивший «для простоты», что молекула воды имеет состав  $\text{O}\text{O}$ , а молекула аммиака состав  $\text{O}\text{O}$  (т. е. что каждая из этих молекул состоит из двух атомов). Берцелиус стремился определить состав молекулы так, чтобы удовлетворительно объяснить возможно большее число химических фактов. Таким образом Берцелиус обнаружил, например, что молекула воды состоит не из двух атомов, а из трех — одного кислородного и двух водородных, что молекула аммиака состоит из четырех атомов — одного азотного и трех водородных, и т. д. Все это привело к тому, что хотя работы Берцелиуса и дали блестящее подтверждение основных идей Дальтона, но полученные Дальтоном конкретные цифры — атомные веса — оказались сплошь неверны. Берцелиус опубликовал свои атомные веса два раза: один раз в 1818 году он выпустил таблицу атомных весов, основанную на химических анализах, которые представляли рекорд возможной тогда в химии точности (но все же в атомных весах, выведенных из этих анализов, еще было очень много неверного вследствие неверных формул состава молекул). В 1826 году Берцелиус опубликовал новую таблицу, в которой он побил свои собственные рекорды точности. Атомные веса, которые были помещены в этой таблице, в громадном большинстве случаев очень близки к тем, которые приняты в химии и теперь.

Небольшую путаницу, которая еще оставалась у Берцелиуса, устранил в 1860 году итальянский химик Станислао Канниццаро; собравшийся 3 сентября 1860 года в Карлсруэ между-

народный конгресс химиков принял систему атомных весов, предложенную Канниццаро, и этот момент принято считать началом современной химии.

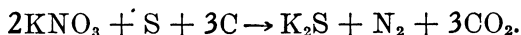
Мы здесь сразу приведем таблицу химических элементов и их атомных весов, принятую в настоящее время. Заметим только, что теперь в качестве единицы атомного веса уж больше не принимают вес атома водорода, как предлагал в свое время Дальтон. Берцелиус обнаружил, что вес атома кислорода приблизительно в 16 раз больше, чем вес атома водорода (отношение веса водорода к весу кислорода в воде очень близко к  $1 : 8$ , а не равно  $1 : 7$ , как думал Дальтон; а, так как по формуле состава молекулы воды, предложенной Берцелиусом, это должно равняться отношению веса двух атомов водорода к весу одного атома кислорода, то отсюда и следует, что вес атома водорода относится к весу атома кислорода как  $1 : 16$ ). Так как атомный вес большинства химических элементов определяется из анализа их соединений с кислородом, а не с водородом, то Берцелиус решил, что гораздо удобнее принять, что вес атома кислорода в точности равен 16 единицам. Единицей атомного веса является поэтому одна шестнадцатая часть веса атома кислорода. При этом, как обнаружил французский химик Дюма, на основании своего очень точного химического анализа воды, атомный вес водорода оказывается не в точности равным единице, а немножко больше. Эта система единиц принята и в той таблице, которую мы приводим. Что касается указанных там же значков (символов) химических элементов, то они уже несколько не похожи на кружки Дальтона. Берцелиус предложил, — и это было принято огромным большинством химиков, а потом и всеми без исключения, — применять в качестве значка химического элемента начальную букву или две буквы его латинского названия (например, водород обозначать буквой H от латинского Hydrogenium; азот — буквой N от латинского

Nitrogenium; железо — значком Fe от Ferrum; медь — Cu от Cuprum; углерод — C от Carbo, и т. д.). Когда нужно обозначить молекулу, то если в ней есть несколько атомов одного и того же химического элемента, обозначение этого атома не повторяется, как это делал Дальтон, изображавший молекулу углекислого газа в виде  $\bigcirc \bullet \bigcirc$ , а просто внизу приписывается цифра, указывающая число атомов, например та же молекула углекислого газа, состав которой Дальтон случайно угадал правильно, пишется в виде  $\text{CO}_2$  (C — углерод, O — кислород), молекула воды записывается —  $\text{H}_2\text{O}$ , молекула аммиака  $\text{NH}_3$  и т. д. Упрямый Дальтон до конца жизни (он умер в 1844 году) не хотел принять обозначений Берцелиуса (как из того же упрямства он не хотел принять и его точных атомных весов, предпочитая свои неточные). Ворча, он говорил, что легче изучить древнееврейский язык, чем понять что-нибудь в химических формулах Берцелиуса. Но мы можем наглядно убедиться в удобстве обозначений Берцелиуса на примере молекулы тростникового сахара, которая по системе Берцелиуса записывается формулой  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$  (12 атомов углерода, 22 атома водорода, 11 атомов кислорода); по Дальтону же пришлось бы нарисовать сорок пять кружков, двенадцать из них зачернить, а в двадцати двух поставить по середине точку. Обозначения Берцелиуса позволяют также легко записать в виде формулы и то, что происходит при химической реакции: это записывают обыкновенно в виде равенства, где слева стоит все, что было до реакции, а справа все, что стало после реакции. Например, горение водорода в кислороде, дающее в результате воду, пишется в виде уравнения:



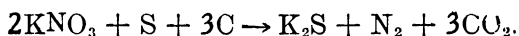
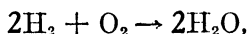
(две молекулы водорода и одна молекула кислорода дают две молекулы воды; заметим по поводу этой формулы, что обыкновенный водород состоит из молекул, содержащих каждая по два водородных атома, и подобным же образом кисло-

род состоит из молекул, каждая из которых составлена из двух атомов кислорода). Горение черного пороха может быть представлено формулой



(две молекулы калийной селитры, атом серы, три атома углерода, соединяясь, дают молекулу сернистого калия, молекулу азота и три молекулы углекислого газа).

Еще удобнее было бы (хотя, впрочем, это мало принято у химиков) вместо знака  $\equiv$  писать стрелку  $\rightarrow$ , отчетливее указывающую направление химического превращения; обе реакции, которые в виде примера были только что написаны, при этом приняли бы вид



После всех этих предварительных разговоров и объяснений приводим таблицу (стр. 52) ныне известных химических элементов и их атомных весов.

Не преувеличивая можно сказать, что эта маленькая таблица, свободно помещающаяся на одной странице, представляет концентрированный результат упорнейшего труда многих поколений химиков, со времени Берцелиуса и до наших дней. (Порядок, в котором в этой таблице расположены элементы, выбран не случайно: элементы расположены в порядке растущего атомного веса).

Спросим себя, что же стало с гипотезой Праута, которая была основана на том, что атомные веса элементов — точные целые числа? Осталось ли что-нибудь от этой гипотезы? Увы, не только весьма точные современные числа не подтверждают мнения Праута о целочисленности атомных весов, но даже и первые измерения Берцелиуса показали, что не все атомные веса являются целыми числами. Примером может служить хлор, атомный вес которого равен 35,457 (в таблице Берцелиуса, составленной в 1826 году, атомный вес хлора 35,4).



**ТАБЛИЦА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИХ СИМВОЛОВ И АТОМНЫХ ВЕСОВ**  
(в скобках приведены названия тех элементов, открытие которых еще сомнительно).

№ п/п	Название и символ	Атомн. вес	№ п/п	Название и символ	Атомн. вес	№ п/п	Название и символ	Атомн. вес
1	Водород H	1,0078	32	Германий Ge	72,60	63	Европий Eu	152,0
2	Гелий He	4,002	33	Мышьяк As	74,93	64	Гадолиний Gd	157,3
3	Литий Li	6,940	34	Селен Se	79,2	65	Тербий Tb	159,2
4	Бериллий Be	9,02	35	Бром Br	79,916	66	Диспрозий Dy	162,46
5	Бор B	10,82	36	Криптон Kr	83,7	67	Голмий Ho	163,5
6	Углерод C	12,00	37	Рубидий Rb	85,44	68	Эрбий Er	167,64
7	Азот N	14,008	38	Стронций Sr	87,63	69	Тулий Tu	169,4
8	Кислород O	16,0000	39	Иттрий I	88,92	70	Иттербий Ib	173,5
9	Фтор F	19,00	40	Цирконий Zr	91,22	71	Кассиопей Cp	175,0
10	Неон Ne	20,183	41	Ниобий Nb	93,3	72	Гафний Hf	178,6
11	Натрий Na	22,997	42	Молибден Mo	96,0	73	Тантал Ta	181,4
12	Магний Mg	24,32	43	Мазурий Ma	—	74	Вольфрам W	184,0
13	Алюминий Al	26,97	44	Рутений Ru	101,7	75	Рений Re	186,31
14	Кремний Si	28,06	45	одий Rh	102,91	76	Осмий Os	190,8
15	Фосфор P	31,02	46	Палладий Pd	106,7	77	Иридий Ir	193,1
16	Сера S	32,06	47	Серебро Ag	107,880	78	Платина Pt	195,23
17	Хлор Cl	35,457	48	Кадмий Cd	112,41	79	Золото Au	197,2
18	Аргон Ar	39,944	49	Индий In	114,8	80	Ртуть Hg	200,61
19	Калий K	39,10	50	Олово Sn	118,70	81	Таллий Tl	204,39
20	Кальций Ca	40,08	51	Сурьма Sb	121,76	82	Свинец Pb	207,22
21	Скандий Sc	45,10	52	Теллур Te	127,5	83	Висмут Bi	209,00
22	Титан Ti	47,90	53	Йод J	126,92	84	Полоний Po	—
23	Ванадий V	50,95	54	Ксенон Xe	131,3	85	(Алабамий Am)	—
24	Хром Cr	52,01	55	Цезий Cs	132,81	86	Радон Rn	222
25	Марганец Mn	54,93	56	Барий Ba	137,36	87	(Виргиний Va)	—
26	Железо Fe	55,85	57	Лантан La	138,92	88	Радий Ra	225,97
27	Кобальт Co	58,94	58	Церий Ce	140,13	89	Актиний Ac	—
28	Никкель Ni	58,69	59	Празеодим Pr	140,92	90	Торий Th	232,12
29	Медь Cu	63,57	60	Неодим Nd	144,27	91	Протактиний Pa	—
30	Цинк Zn	65,38	61	Иллий Il	—	92	Уран U	238,14
31	Галлий Ga	69,72	62	Самарий Sm	150,43			

Поэтому гипотеза Праута в том виде, в каком он ее сформулировал, безусловно должна быть отброшена.

Заметим все же, просматривая нашу таблицу, что очень многие атомные веса, особенно в начале таблицы, весьма близки к целым числам, иногда в точности им равны, например у фтора и углерода, а иногда отличаются от них меньше, чем на 0,01, например у водорода, гелия, азота, натрия и т. д. Это странное обстоятельство заставляет, как будто, отнестись с некоторым вниманием к гипотезе Праута, так как трудно себе представить, чтобы это могло быть результатом чистого случая, но тем не менее такие атомные веса, как у магния или хлора, не говоря уже о многочисленных элементах с большими атомными весами всетаки принуждают отбросить предположение о том, что все атомы состоят из атомов водорода.

Поэтому в XIX столетии совершенно укрепилось и распространилось представление о том, что все тела в мире состоят из этих нескольких десятков сортов атомов, которые являются совершенно независимыми друг от друга основными элементами мироздания. Атомы вечны и неразрушимы и не могут превращаться друг в друга. «Даже, когда солнечная система распадется и на ее развалинах возникнут другие миры, атомы, из которых она состоит, останутся целыми и неизношенными», — так сказал в 1873 году в одной речи знаменитый английский физик Джемс Кларк Максвелл, основатель современной теории электрического и магнитного поля. Из этой цитаты видно, как нераздельно властвовали в физике идеи Дальтона даже через несколько десятилетий после появления его «Химической философии».

И все же, несмотря на все это, среди физиков и химиков продолжало жить смутное убеждение в том, что между атомами различных химических элементов имеются какие-то связи, что эти атомы образуют какую-то естественную систему. Удивительно, что эта мысль была отчетливо сформулирована еще задолго до того, как стало известно, какие именно хими-

ческие элементы существуют в природе. В 1786 году немец Н. Г. Марне напечатал книгу, озаглавленную «О числе элементов». В этой книге, мистической и странной, он выражает свое глубокое убеждение в том, что «от мельчайшей пылинки солнечного луча до святейшего серафима можно воздвигнуть целую лестницу творений» и что атомы химических элементов тоже являются ступенями этой лестницы. Марне продолжает: «Подобно тому, как каждый отдельный тон созвучен тому же тону октавой выше или ниже вследствие связи между числом колебаний их струн, так же и определенные химические элементы («основные вещества», как называет их Марне) могут по тем же причинам стоять в самом близком родстве друг с другом, несмотря на то, что в их естественной последовательности между ними находятся многие вещества: с этими веществами они так же не могут соединиться, как два тона не могут приятно звучать вместе, несмотря на свою близость, если они находятся в отношении секунды».

Эта идея Марне не могла привести ни к каким последствиям, пока химические элементы не были в достаточной мере выделены и изучены. Но после того, как Канниццаро опубликовал (в 1858 году) свою таблицу атомных весов, стремление к естественной классификации химических элементов должно было принести свои плоды. В 1863 году англичанин Дж. А. Ньюлендс, воспользовавшись атомными весами Канниццаро, нашел, что если расположить элементы в порядке возрастания их атомных весов, то такой список элементов естественно разлагается на октавы, т. е. на строчки по семь элементов в каждой, где каждый элемент обладает большим сходством с одинаковым по номеру элементом предыдущей и последующей октавы. Приведем первые три октавы Ньюлендса:

H, Li, Be, B, C, N, O;

F, Na, Mg, Al, Si, P, S;

Cl, K, Ca, Cr, Ti, Mn, Fe.

Аналогия проявляется в том, что все элементы, стоящие на втором месте в своей октаве (литий, натрий, калий), являются, так называемыми, щелочными металлами, образующими соединения по одному и тому же типу, например дающими соли  $\text{LiCl}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ; элементы, стоящие на третьем месте в октаве (бериллий, магний, кальций), являются, так называемыми, щелочно-земельными металлами, дающими тоже похожие друг на друга, но уже иного типа соединения, например соли  $\text{BeCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ . Фтор весьма похож по своей химической природе на стоящий под ним хлор, азот обнаруживает некоторые аналогии с фосфором, кислород с серой и т. д. Заметим, впрочем, что все получается так хорошо и убедительно лишь в первых октавах Ньюлендса: в дальнейших октавах было гораздо больше путаницы, и в некоторых случаях для ее устранения Ньюлендс позволил себе отступать от принятого им плана и располагать элементы не совсем в порядке возрастания атомного веса. Так или иначе, эта предложенная Ньюлендсом классификация, являвшаяся конкретным воплощением старой идеи Марне, не имела никакого успеха среди химиков. Когда Ньюлендс попробовал рассказать о своей классификации химических элементов съезду английских естествоиспытателей, его почти не хотели слушать, и председатель химической секции съезда насмешливо спросил Ньюлендса, «а не пробовал ли он располагать химические элементы в порядке алфавита, и не получалось ли и при этом каких-нибудь закономерностей?»

Через несколько лет после этой попытки Ньюлендса она была повторена двумя другими учеными, работавшими над вопросом естественной классификации элементов совершенно независимо друг от друга. Одним из них был Юлиус Лотар Мейер, профессор университета в Бреслау, другим — Дмитрий Иванович Менделеев, профессор университета в С.-Петербурге. И Мейер и Менделеев сообразили, что могут существовать и элементы, еще не открытые химиками, а поэтому,

если этого требует классификация, можно оставлять в таблице пропуски, соответствующие еще не открытым элементам. Кроме того они сочли схему Ньюлендса с ее одинаковыми строчками чрезмерно узкой и допустили, что строчки (периоды) могут становиться длиннее к концу таблицы. Мы приводим «периодическую таблицу элементов», которую опубликовал Д. И. Менделеев в 1869 году в немецком журнале «Zeitschrift für Chemie» (таблица приводится в несколько измененном виде, но так, что все идеи Менделеева, содержащиеся в его статье, переданы правильно).

H																
Li Be B C N O F																
Na				Mg Al Si P S Cl												
K	Ca	Sc	Y	Zr	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Br
Rb	Sr	Ce	La	Pr	Nb	Mo	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
Cs	Ba					Ta	W	Pt	Ir	Os	Hg	Au				
Th	Pa															

В этой таблице курсивом даны те элементы, которые были поставлены Менделеевым неправильно, вследствие незнания

их атомных весов или по другим причинам (в 1870 году Менделеев исправил большую часть этих ошибок). Уже в четвертой строке таблицы классификация потребовала оставления пустых мест. На этих пустых местах должны находиться какие-то еще неоткрытые элементы, а именно должен быть один элемент между кальцием и эрбием (впрочем эрбий здесь поставлен по ошибке, и уже в 1870 году Менделеев правильно поставил вместо эрбия титан) и два элемента между цинком и мышьяком. Этим элементам Менделеев дал следующие названия: элементу, который должен стоять после кальция он дал имя экабор, а двум элементам, которые должны идти за цинком, имена — экаалюминий и экакремний (экабор, как видно из таблицы, должен быть аналогичен бору, а экаалюминий и экакремний — алюминию и кремнию). Менделеев был настолько убежден в своей классификации, что осмелился заранее описать свойства этих трех элементов, прежде чем их откроют. Чтобы предсказать свойства, например, экакремния, он сообразил, что экакремний, по своим свойствам, должен быть чем-то средним между цинком и мышьяком (но заметно ближе к мышьяку) и что, с другой стороны, он должен представлять много сходства с кремнием и с элементом под ним, т. е. с оловом, будучи чем-то средним между кремнием и оловом. (Все это читатель легко поймет, пользуясь приведенной выше таблицей).

И что же? Предсказания Менделеева блестящим образом сбылись. Летом 1875 года французский химик Лекок-де-Буа-Бодран, исследуя найденный в Пиренейских горах кусок руды (цинковой обманки), обнаружил в этой руде новый химический элемент, который по своим свойствам был совершенно таким же, как предсказанный Менделеевым экаалюминий. Найденному им элементу Лекок-де-Буа-Бодран дал название галлий (от латинского слова Галлия, что значит Франция). В 1879 году шведские химики Нильсен и Клеве нашли в одном редком норвежском минерале эвксените предсказанный Менде-

леевым экабор и назвали его скандием (по латыни Скандия значит Швеция). И наконец в 1885 году немецкий химик Винклер, исследуя только что открытый в фрейбургских рудниках в Саксонии минерал аргиродит, нашел в нем предсказанный Менделеевым эакремний. Продолжая тот же ряд патристических названий, Винклер назвал эакремний германием.

Чтобы убедиться насколько точны были предсказания Менделеева, сравним свойства эакремния и германия:

*Свойства эакремния (обозначался Es), предсказанные Менделеевым в 1871 г.*

Эакремний — серый металл, плавится с трудом, атомный вес — 72.

1 см<sup>3</sup> эакремния должен весить 5,5 гр.

Окись эакремния должна иметь формулу EsO<sub>2</sub> и весить 4,7 гр/см<sup>3</sup>. Под действием водорода из нее должен выделяться эакремний.

Хлористый эакремний EsCl<sub>4</sub> должен весить 1,9 гр/см<sup>3</sup> и кипеть при 90° С.

Фтористый эакремний EsF<sub>4</sub> не летуч.

Сернистый эакремний EsS<sub>2</sub> должен растворяться в сернистом аммонии.

Эакремнийэтил Es(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub> должен весить 0,96 гр/см<sup>3</sup> и кипеть при 160° С.

*Свойства германия (обозначается Ge), изученные К. Винклером в 1886 г.*

Германий — серый, трудно возгоняющийся металл, атомный вес — 72,6.

1 см<sup>3</sup> германия весит 5,409 гр.

Окись германия GeO<sub>2</sub> весит 4,703 гр/см<sup>3</sup>. Под действием водорода из нее выделяется германий.

Хлористый германий GeCl<sub>4</sub> весит 1,887 гр/см<sup>3</sup> и кипит при 86° С.

Фтористый германий GeF<sub>4</sub>3H<sub>2</sub>O твердое белое вещество.

Сернистый германий GeS<sub>2</sub> растворяется в сернистом аммонии.

Германийэтил Ge(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub> весит 0,991 гр/см<sup>3</sup> и кипит при 160° С.

Пожалуй, можно сказать, что Менделеев предвидел в этом элементе все, кроме его названия.

После такой блестящей победы никто уже не мог сомневаться в том, что «периодический закон» Менделеева действительно выражает какое-то весьма глубокое свойство химических элементов и что атомы химических элементов могут быть расположены в какой-то «системе родства». Но что означает это родство химических элементов, эти связи между





элементов, чем во времена Менделеева. Заметим, что предсказание свойств новых элементов на основании периодического закона неоднократно имело место и впоследствии; так например В. Рэмзэй, после открытия (им и Дж. В. Рэлеем) аргона и гелия, предсказал существование неона, криптона, ксенона, которые он потом и открыл вместе с Трэверсом в 1898 году.

Нет ничего невозможного в том, что в природе существуют и элементы, обладающие более высоким атомным весом, чем уран. Эти элементы, если они существуют, должны были бы в нашей таблице попасть на места, идущие после урана. Но до сих пор эти элементы еще не были обнаружены в природе. Несколько лет тому назад английский астроном Дж. Х. Джинс высказал предположение о том, что элементы, имеющие атомный вес больший, чем уран, существуют в большом количестве во внутренних частях солнца и звезд. Это свое мнение Джинс обосновал следующим образом. Астрономы думают, что земля и другие планеты возникли, когда солнце, одиноко блуждая в пространстве, случайно приблизилось к другой какой-то звезде. Под влиянием силы притяжения, исходившей от этой звезды, на раскаленной поверхности солнца вздулась огромная волна — вроде тех приливных волн, которые вздымаются в наших морях и океанах под действием притяжения луны, но только несравненно больших размеров. Эта грандиозная приливная волна на раскаленной поверхности солнца, поднимаясь по направлению к звезде, которая приблизилась к солнцу, — эта волна и была матерью земли и планет. Земля и другие планеты возникли из брызг, из раскаленных капелек, оторвавшихся от этой приливной волны. Солнце и встретившаяся на его пути звезда уже давно успели разойтись, но капельки, оторвавшиеся от солнца, продолжают двигаться вокруг него, подчиняясь его могущественному притяжению. Постепенно они остыли, покрылись твердой корой — короче говоря, они-то и превратились в толпу пла-

нет, окружающих солнце. Если это все так действительно и было, как думают астрономы, то ясно, из каких веществ должны состоять планеты. Они должны состоять из тех же самых химических элементов, которые входят в состав наружных частей Солнца, поднявшихся когда-то в виде приливной волны навстречу приблизившейся звезде.<sup>1</sup> Но во внутренних частях солнца, которые остались незатронутыми грандиозной пертурбацией, происходившей на поверхности солнца под влиянием притяжения к столкнувшейся с ним звезде, — в этих внутренних частях обязательно ли должны быть те же самые хими

---

<sup>1</sup> Это мнение подтверждается фактами. В середине прошлого столетия немецкие ученые Кирхгоф и Бунзен разработали спектральный анализ — способ узнавать химический состав любого вещества по спектру того света, который испускается этим веществом в газообразном состоянии при очень высокой температуре. Посредством особого прибора — спектроскопа — свет, испускаемый интересующим нас веществом, разлагается в спектр совершенно таким же образом, как свет солнца разлагается в известном физическом опыте на «семь цветов радуги» (эти «семь цветов радуги» и есть, собственно говоря, спектр солнечных лучей). Кирхгоф и Бунзен изобрели способ узнавать химический состав светящегося тела из рассмотрения его спектра. Когда этот способ был применен астрономами к изучению спектра лучей света, приходящих к нам от солнца, от планет и от звезд, то оказалось, что солнце и звезды не состоят из каких-то особенных специальных «небесных» веществ, которых нет на земле, — нет, они (или лучше сказать их наружные части, от которых доходит до нас свет) состоят из тех же самых химических элементов, которые известны и у нас на земле. Водород, кислород, железо, кремний и т. д. — все эти вещества распространены во всей вселенной, вплоть до самых отдаленнейших ее уголков, от которых даже лучи света, самые быстрые вестники в мире, путешествуют к нам сотни миллионов лет. Нашлось, было, одно только исключение: астрономы Жансенн, Локайер и Франк-ланд обнаружили по спектру самых наружных частей солнца, что там должно присутствовать какое-то вещество, которого нет на земле, и дали этому веществу название гелий (от греческого слова гелиос — солнце), да и то, через много лет после этого, в 1896 году знаменитый английский химик Вильям Рэмзэй нашел гелий и на земле (в составе некоторых минералов). История о том, как гелий нашли сперва на солнце, а потом на земле, и как гелий стал играть большую роль в технике (гелием, который является очень легким и к тому же невоспламеняемым газом, наполняют оболочки коммерческих и боевых дирижаблей), — эта история подробно рассказана в книжке М. П. Бронштейна «Солнечное вещество», которая выходит в Государственном издательстве детской литературы.

ческие элементы, те же самые сорта атомов, которые есть на поверхности солнца и которые вошли в состав земли и планет? Ясно, что это не обязательно, и можно даже предположить, что во внутренних слоях солнца находятся самые тяжелые атомы, а на поверхности солнца плавают лишь сравнительно легкие атомы, как льдинки на поверхности воды. Чем дальше мы спускаемся вглубь солнца, тем реже встречаются легкие атомы и тем чаще тяжелые. Ничего нет невозможного, как и предположил Джинс, что самые тяжелые сорта атомов встречаются вообще только во внутренних слоях и что их совсем нет в тех наружных слоях солнца, которые дали материал для формирования земли и планет.

Если Джинс прав, то периодическая таблица элементов не должна кончаться ураном: в природе должны существовать какие-то еще нам неизвестные «заурановые» элементы. Эти неведомые химические элементы, может быть, играют очень большую роль в явлениях, происходящих в глубоких слоях солнца и звезд. К вопросу о «заурановых» элементах мы еще вернемся в девятой главе.

Таково, в общих чертах, учение об атомах химических элементов, созданное Дальтоном и определившее все дальнейшее развитие химии в XIX столетии. Но если гипотеза об атомах и молекулах оказалась такой важной и такой полезной для химии, то какую роль она сыграла в физике, занимающейся гораздо более широкой областью явлений природы, чем химия? Следует заметить, что в физике гипотеза атомов существовала и играла очень большую роль задолго до той поры, когда Дальтон сделал учение об атомах и молекулах необходимым для того, чтобы хоть что-нибудь понимать в химических явлениях. Ведь мы уже говорили о том, как к теории атомов относился такой гениальный и авторитетный физик как Исаак Ньютон. Представление об атомах служило физикам для того, чтобы составить ясное понятие о целом ряде

физических явлений. Мы нагреваем тело — это тело расширяется. С точки зрения атомной гипотезы это значит, что атомы несколько отошли друг от друга — пустые промежутки между ними увеличились. Как можно было бы наглядно представить себе такое простое явление как расширение тел при нагревании, если бы считать вещество не состоящим из атомов, а непрерывным и сплошным? Все газы обладают гораздо меньшей плотностью, чем жидкости и твердые тела — это значит, что атомы (или молекулы) газов находятся на очень больших расстояниях друг от друга; поэтому-то так легко сжать газ, т. е. уменьшить пустые промежутки между его атомами или молекулами. Сжать сколько-нибудь заметно жидкость или твердое тело очень трудно, а уменьшить посредством сжатия объем жидкого или твердого тела в несколько раз вовсе невозможно. Что это значит? Это значит, что в жидких и твердых телах между атомами почти нет пустых промежутков; атомы почти соприкасаются друг с другом, как дробинки в мешочке с дробью, если его хорошенько встряхнуть. Всякий газ давит изнутри на поверхность стенок того сосуда, в котором этот газ заключен. Как это понять? Очень просто: стоит только предположить, что атомы (или молекулы) газа не находятся в покое, а, напротив того, все время очень быстро движутся. Если это так, то они должны все время наталкиваться на стенки сосуда и отскакивать от них, как отскакивают бильярдные шары от борта бильярда; стенки сосуда, в котором заперт газ, должны все время испытывать изнутри целый град толчков, целую бомбардировку со стороны молекул газа. Если увеличить объем сосуда, отодвинув в нем крышку или поршень, или если открыть перед молекулами газа дверь, ведущую в соседнее пустое пространство, то быстро движущиеся молекулы сейчас же начнут проникать в предоставленный им новый объем, пока весь сосуд с газом не заполнится этим газом равномерно и целиком. Вот почему всякий газ всегда стремится расшириться и заполнить

весь предоставленный ему объем. Легко понять что будет, если сжать газ, находящийся в каком-нибудь сосуде с поршнем: молекулы газа, занимавшие раньше большой объем, теперь вынуждены будут сконцентрироваться в меньшем объеме, а поэтому на каждый квадратный сантиметр поверхности стенки будет приходиться в течение секунды больше ударов молекул, т. е. молекулярная бомбардировка на каждый квадратный сантиметр стенки возрастет. Давление газа, запертого в сосуде, увеличивается при уменьшении объема этого сосуда. Если нагреть газ, запертый в сосуде, не изменяя его объема, то давление газа, как показывают опыты, возрастет. Так как число атомов и молекул осталось таким же самым, то для того, чтобы понять, почему молекулярная бомбардировка увеличилась, необходимо допустить, что при повышении температуры молекулы и атомы начинают двигаться быстрее: вследствие увеличившейся скорости их движения возрастет и число ударов в секунду о стенку (ведь при возросшей скорости каждая молекула успевает в течение секунды большее число раз слетать от одной стенки сосуда до другой и обратно), и, кроме того, возрастет и сила каждого отдельного удара. Это допущение о том, что при повышении температуры скорость движения атомов и молекул растет, должно относиться не только к газам, но и к жидкостям и к твердым телам: без этого невозможно понять, каким образом при нагревании происходит испарение.

В самом деле, как должны мы наглядно представлять себе твердые тела и жидкости? Жидкости очень подвижны и текучи; это значит, что атомы и молекулы жидкостей, все время тесно соприкасаясь друг с другом, вместе с тем легко и быстро скользят, перемещаясь по всему объему жидкости (иногда бывает, что молекула данной какой-нибудь жидкости так же легко и просто может перемещаться среди молекул другой жидкости: вот почему так быстро происходит, например, пе-

ремешивание воды и спирта, если спирт налит поверх воды в какой-нибудь сосуд). Твердые тела, наоборот, имеют некоторую упругость, т. е. стремятся все время сохранить свою форму; поэтому приходится заключить, что атомы твердых тел всегда находятся в каких-то определенных положениях равновесия и могут только совершать около этих положений более или менее быстрые колебания. Быстрота движений, совершаемых молекулами и атомами жидких и твердых тел, должна, как и в газах, возрасти при увеличении температуры. Этим объясняется испарение при нагревании, так как более быстро движущиеся молекулы жидкости могут преодолеть притяжение со стороны окружающих молекул той же жидкости и выскочить из жидкости наружу. Пар, насыщающий пространство над поверхностью данной жидкости, — это и есть тот газ, который состоит из таких «сбежавших из жидкости» молекул. Из жидкости выскакивают, правда, все новые и новые молекулы, но молекулы пара, падающие на жидкость, проникают туда вновь, и поэтому в конце концов устанавливается равновесие между жидкостью и ее паром, когда в каждую секунду столько же молекул выскакивают из жидкости («испаряется»), сколько их падает в жидкость обратно. Из всего сказанного видно, какие простые и ясные представления вносит гипотеза атомов и молекул в физику. Основным в этой атомно-молекулярной картине газов, жидкостей и твердых тел является представление о том, что с возрастанием температуры растет и скорость движения атомов. Это представление сыграло очень большую роль в истории атомистического учения.

До XIX столетия среди физиков господствовало мнение, что теплота есть какое-то невесомое вещество — «теплород», которое может соединяться с обычными веществами. Нагретое тело, согласно этой точке зрения, — это такое, в котором много теплорода; при охлаждении тела теплород из него уходит. Это широко распространенное представление о вещественности

тепла было опровергнуто, как только физики стали изучать связь между теплотой и движением. Наличие этой связи очевидно: при трении, которым сопровождается движение, возникает тепло, — этим издавна пользовались для добывания огня народы, стоящие на низких ступенях культуры, — с другой же стороны теплота, выделяющаяся при сжигании угля в топке парового котла, является основной причиной возникающего в паровой машине движения поршня в цилиндре, махового колеса, шатуна и т. д.

В 1798 году некий Бенджамен Томсон, американец, авантюрист, прежде сражавшийся на стороне Англии во время войны за независимость Соединенных Штатов, а затем поступивший на службу к баварскому королю, от которого он получил титул графа Румфорда, наблюдал в мюнхенском арсенале сверление пушечных жерл. Сверление сопровождалось выделением очень большого количества тепла. Когда Румфорд погружал просверливаемую металлическую болванку вместе с работающим в ней сверлом в воду, то вода через два с половиной часа начинала кипеть. Пораженный этим огромным выделением тепла, Румфорд подробно исследовал все условия, при которых тепло возникает. Оказалось, что если просверлить в болванке жерло острым сверлом, а затем заменить его тупым сверлом, которое уже не может отделять от металла стружки, но все же поворачивается с большим трением, то дальнейшее вращение сверла позволяет извлечь из болванки любое количество тепла — стоит только вращать сверло достаточно долго. Это несовместимо с представлением о вещественности тепла; если бы теплота была веществом («теплородом»), то из данной болванки нельзя было бы извлечь больше тепла, чем в ней в действительности содержится. Поэтому Румфорд решил, что теплота не вещество, а движение. Теплота — это движение невидимых глазу атомов, из которых состоит любое вещество. Нагреть какое-нибудь тело — это значит привести его атомы в более быстрое движение, чем то

в котором они находились раньше. Охладить тело — значит замедлить движение атомов. Так возникла механическая теория тепла (термодинамика), получившая свое окончательное обоснование уже только в последней четверти XIX века — в руках немца Людвиг Бальцмана и американца Уилларда Гиббса, которые доказали, что все законы тепловых явлений могут быть выведены теоретически, если применять теоремы механики к движению невидимых глазу атомов. Это был такой же триумф атомистической теории, как и тот, который ей доставили работы Дальтона в химии: не только химические, но и физические явления легко объяснялись с помощью предположения, что все тела состоят из мельчайших, невидимых глазу атомов.

И все же атомистической теории в это время (к концу XIX столетия) еще не хватало многого. Представление об атомах все еще не было достаточно конкретным. Пусть мы знаем, что существуют такие-то и такие-то атомы, — атомы кислорода, железа, фосфора, серы и т. д., — но много ли мы знаем о самих этих атомах? Мы можем только сравнивать их друг с другом, можем говорить, что атом кислорода в 16 раз тяжелее атома водорода, а атом серы в два раза тяжелее атома кислорода, но о каждом из этих атомов в отдельности мы ничего не можем сказать. Мы не можем сказать, сколько весит атом водорода и каковы его размеры; мы знаем, что капелька воды состоит из молекул  $\text{H}_2\text{O}$ , но не можем сказать из скольких и х молекул и т. д. И постепенно у многих начинало складываться впечатление, что этого мы так-таки никогда и не узнаем и что ничего кроме отношений химических элементов друг к другу в природе нет, — а те атомы — атомы водорода, кислорода, азота, которые Дальтон так ясно представлял себе и рисовал на бумаге в виде кружочков — эти атомы являются чистой фантазией, — мы никогда не сумеем их взвесить, измерить и понять их настоящие свойства. Жесточайшим нападкам подверглась атомистическая теория со сто-



роны многих философов. Артур Шопенгауэр утверждал в своем сочинении «Мир как воля и представление», что химические атомы Берцелиуса являются лишь формой выражения тех относительных количеств, в которых вещества вступают друг с другом в химические соединения; поэтому следует считать атомы по существу лишь арифметическими понятиями, лишь «расчетными единицами» (Rechenpfennige). В другом сочинении — «О философии естествознания» — он бранит химиков, называя их «невежественными аптекарями, занимающими профессорские кафедры», и говорит, что они «с таким детским самомнением и с такой уверенностью толкуют об эфире и его колебаниях, об атомах и о прочих глупостях, как если бы они все это видели и трогали руками». В конце XIX столетия возникла целая школа физиков и философов, которая осуждала все попытки атомистической теории проникнуть во внутренний механизм явлений: эти философы признавали достойным изучения только непосредственное ощущение предметов внешнего мира и отвергали всякие стремления объяснять их наблюдаемые свойства (их цвет, твердость, температуру и т. п.) при помощи атомов, которые настолько малы, что наши органы чувств не могут их наблюдать непосредственно. (Уничтожающую критику учений этой философской школы можно найти в книге В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм»). Выдающиеся представители этой школы (Мах, Дюгем, Оствальд и др.) выставили против теории атомов те же самые возражения, какие в свое время выставил Шопенгауэр. Все они единодушно сходились на том, что «атомистической теории следовало бы уже давно истлеть в пыли библиотек», как выразился Вильгельм Оствальд в своих лекциях по философии природы, которые он читал в лейпцигском университете летом 1901 года.

Но сторонников атомистической теории не смущали злые нападки философов. Они упорно стремились найти

убедительные доказательства реальности атомов. Увидеть атом, взвесить его, измерить его размеры — вот что стало заветной мечтой атомистов. Но как это сделать, если атомы настолько малы, что ускользают не только от наших невооруженных органов чувств, но и от самых усовершенствованных микроскопов! Жигмонди и Зидентопф построили и усовершенствовали так называемый «ультрамикроскоп», позволяющий обнаружить в коллоидном растворе золота золотые частички, вес которых чуть ли не в миллиард миллиардов раз меньше грамма. Но в том же растворе присутствуют и более мелкие частички золота — значит атом золота весит еще меньше. Каким же образом возможно взвесить атом? Не следует ли отказаться от этой задачи, признать ее принципиально неразрешимой? Если мы признаем эту задачу принципиально неразрешимой, т. е. если мы признаем атомы принципиально ненаблюдаемыми, то тогда Оствальд и компания окажутся правы, потому что принципиально ненаблюдаемое не может служить объектом изучения в физике и должно считаться лишь результатом неправильного образования понятий. Вот почему атомисты не хотели примириться с таким решением вопроса и не захотели утверждать, что «атомы существуют, но их наблюдать, взвесить и измерить никогда не удастся». Если бы они это утверждали, то это означало бы капитуляцию перед философами, считавшими, что атомы должны сгнить в пыли библиотек.

И в конце концов атом действительно удалось взвесить. Этому помогло одно странное явление, которое было открыто еще в первой половине XIX века и на которое физики в свое время не обратили должного внимания. Это явление называется *брауновским движением*.

В 1828 году знаменитый английский ботаник Роберт Браун проделал одну в высшей степени интересное наблюдение. Испытывая только-что присланный ему новый усовершенствованный микроскоп с ахроматическим объективом, Роберт

Браун вздумал рассмотреть с помощью этого микроскопа ничтожную каплю жидкости, содержащейся в крохотных зернышках пыльцы растений. В такой жидкости всегда имеется большое количество микроскопических твердых частиц. Как удивлен был Браун, когда увидел, что эти частицы не остаются на месте, а движутся, движутся непрерывно, точно исполняя какой-то фантастический танец! Когда в поле зрения микроскопа было видно много таких частиц, то получалось такое же впечатление, как от тучи каких-то мельчайших мошек. Твердые частицы микроскопических размеров, находящиеся в жидкости, движутся, как если бы они были живыми, и, действительно, у наблюдателя остается такое впечатление, как если бы это было так. Но уже Роберт Браун, который первый наблюдал это хаотическое движение микроскопических частиц, получившее свое название от его имени, пришел к другому заключению: частицы движутся не потому, что они живые. Частицы мертвого вещества, обладающие такими же размерами, тоже должны совершать такое же самое движение, если только они окружены со всех сторон жидкостью. Так утверждал Браун, и это было полностью подтверждено многочисленными последующими наблюдениями.

Можно было бы думать, что брауновское движение микроскопических частиц вызывается какими-то потоками в самой жидкости, связанными с разностью давления в различных точках жидкости. Всякому приходилось наблюдать движение пылинок в воздухе, освещенном падающими сбоку солнечными лучами. Это движение действительно связано с такими токами воздуха, но брауновское движение имеет совершенно другой характер. В самом деле, если внимательно наблюдать за движением пылинок в солнечном луче, то легко заметить, что соседние пылинки, попавшие в одну и ту же небольшую струю воздуха, движутся в одну и ту же сторону. А если наблюдать за брауновским движением микроскопических частиц, то оказывается, что между направлением движения со-

седних частиц нет решительно ничего общего: частицы движутся совершенно независимо друг от друга, даже если им случится подойти друг к другу на самое крохотное расстояние, равное диаметру отдельной частички. Значит совсем не от токов жидкости происходит это непостижимое и фантастическое движение микроскопических твердых частичек.

Во второй половине XIX века брауновское движение подробно исследовал французский физик Гуи. Он проделал целый ряд опытов, которые убедили его в том, что причина брауновского движения скрыта в самой жидкости. Не от внутренних токов жидкости, вызванных ничтожными разностями температур, и не от внешних толчков и сотрясений происходит брауновское движение. Гуи пробовал сравнивать брауновское движение в лаборатории, расположенной на шумной улице, по которой проезжают тяжелые экипажи, с тем же брауновским движением, наблюдаемым ночью в глухом подвале, в деревне — разницы не получалось никакой. Толчки от экипажей заметны, но они сказываются не на хаотическом движении брауновских частиц, а на движении всей капельки жидкости в целом: двигаясь как целое, капелька увлекает за собой все частицы в одном и том же направлении, и это движение очень легко отличить от накладывающегося на него хаотического движения брауновских частиц, происходящего по всем возможным направлениям. Гуи убедительно доказал, что брауновское движение, как уже предполагал и сам Браун, нисколько не связано с тем, что жидкость, в которой оно наблюдается, взята из живого существа — из растения: искусственно приготовленные жидкости с взвешенными в них микроскопическими частицами, в которых нет ничего живого, тоже обнаруживают брауновское движение. В 1881 году польский физик Бодашевский показал, что брауновское движение происходит и в газах, а не только в жидкостях. Для того, чтобы наблюдать брауновское движение, он рассматривал при боковом освещении микроскопические частички, образующие табачный дым. Крохотные частички

угля, из которых состоит дым, плясали во все стороны совершенно таким же образом, как плясали твердые частички, наблюдавшиеся Робертом Брауном в жидкости.

Настоящую причину брауновского движения угадал в 70-х годах прошлого столетия бельгиец Карбонэль. Его объяснение, гениальное по своей простоте, состоит в следующем: микроскопические частицы движутся потому, что они испытывают толчки со стороны невидимых молекул и атомов окружающей их жидкости. Рассматривая движение брауновских частичек, мы получаем некоторое представление о том, как движутся невидимые молекулы жидкости — совершенно таким же образом, как мы угадываем о волнении на море, когда, стоя далеко от берега, видим качание лодки, швыряемой волнами во все стороны. Брауновское движение является поэтому мостом, соединяющим невидимый мир атомов и молекул с миром, доступным восприятию при помощи наших органов чувств.

Почему брауновское движение можно наблюдать только в том случае, когда частички очень малы? Очень просто, отвечает на этот вопрос Карбонэль: если поверхность частицы велика, то количество толчков, получаемых ею справа, всегда окажется приблизительно равным количеству толчков, получаемых ею же слева, и ничтожное различие в количестве толчков будет совершенно недостаточно для того, чтобы сдвинуть с места большую и тяжелую частицу. Если же частица имеет ничтожный вес и ничтожные размеры, то в хаосе молекулярных движений жидкости всегда может случиться, что с одной стороны частицы будет в данный момент случайно больше толчков, чем с другой, а поэтому легкоподвижная частица двинется в ту сторону, куда ее толкнут молекулы. Через какой-то очень короткий промежуток времени избыток молекулярных толчков будет сдвигать брауновскую частицу уже по другому направлению, еще через какой-то короткий промежу-

ток времени — по третьему и т. д. и т. д. Вот почему брауновская частица и совершает свое движение, напоминающее пляску дикарей.

Если это предложенное Карбонэлем объяснение правильно, то чем частицы легче и мельче, тем брауновское движение должно быть интенсивнее. Так и есть в действительности — уже Браун сумел это заметить. Кроме того, ведь мы знаем, что движение молекул жидкости происходит тем быстрее, чем выше температура, и в самом деле Гуи нашел из своих опытов, что при повышении температуры брауновское движение делается все интенсивнее и интенсивнее. Когда Жигмонди изобрел свой ультрамикроскоп и смог наблюдать ничтожнейшие частицы золота в коллоидном растворе (диаметр частиц меньше миллионной доли сантиметра), то брауновское движение этих частиц оказалось таким быстрым, что получилось какое-то сплошное мелькание: частицы двигались с такой скоростью, что их иногда удавалось видеть только в точках поворота их пути, где скорость несколько уменьшалась. Жигмонди описывает свое первое впечатление так: «Это какое-то непрерывное прыганье, пляска, скакание, столкновения и разлетаения, так что трудно разобраться в этой путанице». Шведский физик Сведберг, изучавший после Жигмонди брауновское движение частиц в коллоидном растворе золота, придумал для устранения этого мелькания следующий способ: он открывал поле зрения ультрамикроскопа с помощью моментального фотографического затвора, регулируя продолжительность того времени, в течение которого затвор открыт. Уменьшая этот промежуток времени, можно добиться того, что мелькание исчезает, а при дальнейшем его уменьшении частицы начнут казаться неподвижными, как летящая птица на моментальном фотографическом снимке. Чем быстрее брауновское движение, тем более коротким должен быть тот промежуток времени, в течение которого затвор открыт. И Сведберг нашел из своих опытов — в полном согласии с теми теоретическими вывода-

ми, о которых мы говорили — что при повышении температуры коллоидного раствора приходится открывать фотографический затвор на все более и более короткое время для того, чтобы мелькание прекратилось.

Мы переходим теперь к рассказу о классических работах, которые сделал французский физик Жан Перрен (1908 г.). В этих работах было окончательно проверено и установлено, что брауновское движение в жидкостях вызвано движением молекул и тем самым дано решающее доказательство действительного существования молекул и атомов.

Перрен брал кусочки резиновой смолы «гуммигута» (желтая краска, которую можно купить в любой москательной) и растирал их рукой в воде, как растирают кусочек мыла. Гуммигут постепенно растворялся в воде, пока она не становилась яркожелтого цвета. После этого Перрен брал немножко такой жидкости под микроскоп. Под микроскопом оказывалось, что гуммигут на самом деле совсем не растворился в воде, а распался на множество шаровидных мелких зернышек, которые разбрелись по всему объему воды. Зернышки эти очень различны по размерам. А Перрену хотелось иметь такую жидкость, в которой были бы совершенно одинаковые по размерам частицы гуммигута. Для этого он воспользовался «центрифугой» (центробежной машиной), такой же самой, какой пользуются на крупных молочных фермах для отделения сливок от молока или же в медицинских лабораториях для удаления кровяных шариков из крови, после чего остается однородная жидкость — кровяная сыворотка. Центрифуга Перрена делала 2500 оборотов в минуту, и возникающая при этом центробежная сила выбрасывала из жидкости зернышки гуммигута. Перпендикулярно к оси центрифуги были расположены стеклянные пробирки, в которых содержалась эмульсия гуммигута (так называется вода с взвешенными в ней частичками гуммигута). Центробежная сила, возникавшая при вращении центрифуги, была настолько велика, что на расстоянии 15 см

от оси она превосходила силу тяжести в тысячу раз. Эта центробежная сила стремилась прижать частицы гуммигута ко дну пробирки, расположенному подальше от оси: частицы «выпадают» из эмульсии ко дну пробирки под влиянием центробежной силы совершенно таким же образом, как грязь и муть выпадает из речной воды под влиянием силы тяжести — разница лишь в том, что в опытах Перрена частицы выпадали не вниз, а в бок, в ту сторону, в которую действовала центробежная сила.

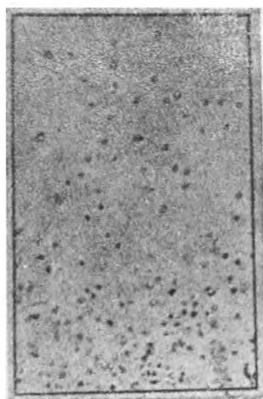
Первыми выпадали тяжелые частицы, а вслед за ними и легкие. Это давало возможность отделить частицы друг от друга по весу (а значит и по размерам, потому что все частицы сделаны из одного и того же материала и поэтому, чем больше их вес, тем больше и размеры). Разумеется, разделение происходило не сразу, а постепенно: задумав получить однородную эмульсию с частицами какого-то совершенно определенного размера, Перрен сперва получил эмульсию, в которой частиц такого размера было больше, чем частиц других размеров, затем эту эмульсию он снова подвергал центрифугированию и выделял из нее часть, в которой процент частиц заданных размеров был еще больше и т. д. и т. д., пока, наконец, не получилась порция эмульсии, в которой были зернышки только нужных размеров. Это — очень кропотливая и тяжелая работа: приходится работать целый месяц для того, чтобы из одного килограмма гуммигута получить несколько десятых или даже сотых долей грамма круглых зерен нужной величины. Таким образом Перрен сумел получить несколько порций эмульсии с диаметром зерен в 0,50, 0,46, 0,37, 0,21 и 0,14 микрон (микрон — это тысячная доля миллиметра).

С помощью таких эмульсий Жан Перрен произвел множество замечательных опытов, о которых мы здесь и расскажем. Он поместил каплю эмульсии с определенным диаметром зерен в плоскую ванночку (кюветку) с глубиной 0,1 мм. Кюветка была вслед за тем покрыта тонким покровным стеклыш-



ком, края которого были залиты парафином: таким образом капля оказалась размазанной в сосуде, в котором она герметически заперта, так что никакое испарение уже невозможно.

Перрен сперва поставил свою кюветку на бок и стал смотреть на нее в микроскоп. В поле зрения микроскопа оказалась тонкая вертикальная водяная стенка, внутри которой распределились зернышки гуммигута. Распределение зернышек



Распределение зернышек гуммигута по высоте (фотография, сделанная в лаборатории Перрена).

сперва было однородным (это произошло, как потом выяснилось, вследствие неизбежного встряхивания препарата при его установке под микроскоп), но потом, с течением времени, распределение изменилось и в конце концов стало таким: очень много зернышек внизу, а по мере продвижения вверх их становится все меньше и меньше. Число зернышек в одном кубическом микроне уменьшается с увеличением высоты и при том по некоторому вполне определенному закону.

Этот закон уменьшения плотности эмульсии с высотой Перрен захотел исследовать. Для этого

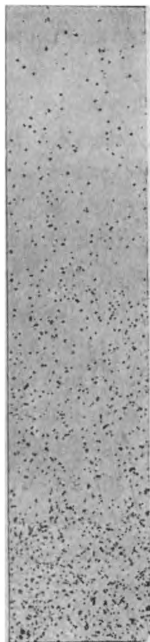
он положил кюветку на доньшко и стал смотреть на нее сверху в микроскоп, имевший очень маленькую глубину поля зрения: в микроскоп было видно все, что происходит в тонком слое глубиной в один микрон. Передвигая микроскоп вверх и вниз, можно было помещать этот слой то выше, то ниже. Перрен стал работать так: поставил микроскоп на какой-то высоте и начал считать, сколько зернышек виднеется в поле зрения на этой высоте, затем передвинул микроскоп на новую высоту и снова сосчитал число зернышек и т. д. Заметим, что при этом числом зернышек считается среднее из несколь-

ких наблюдений, потому что зернышки движутся совершенно хаотически и, следовательно, их число в поле зрения микроскопа бывает то больше, то меньше, в зависимости от случая. Поэтому на одной и той же высоте Перрен производил подсчет зернышек много раз и затем уже вычислял значение, характерное для каждой такой высоты.

Казалось бы, можно было бы производить под микроскопом моментальные фотографические снимки, а затем уже на досуге спокойно сосчитать, сколько имеется зернышек в поле зрения на данной высоте. Но моментальные фотографические снимки в этих условиях плохо получаются, потому что не удастся осветить зернышки достаточно ярко (Перрену удавалось получать моментальные снимки в случае частиц с диаметром больше, чем  $\frac{1}{2}$  микрона, для меньших же частиц фотографии получались чересчур неотчетливые). Поэтому Перрену пришлось сильно сузить поле зрения микроскопа, помещая между микроскопом и препаратом кружочек фольги, проколотый иглой: в микроскоп было видно только то, что происходило на площади, равной отверстию, сделанному иглой. Препарат освещался очень короткое время — для этого на пути лучей, освещавших препарат, ставился фотографический затвор, — и каждый раз в поле зрения было видно сравнительно небольшое число зернышек: не больше пяти. Для этого-то и должен был Перрен сузить поле зрения микроскопа: если бы каждый раз в поле зрения получалось много частиц, то наблюдатель никак не успевал бы их сосчитать. Сосчитать же зернышки, если их число не превышает пяти, легко. Зато приходилось компенсировать это уменьшение поля зрения тем, что в одном таком поле зрения делалось очень много отсчетов, и затем уже из полученных результатов вычислялось арифметическое среднее.

Приведем результаты одного из опытов Перрена. Глубина кюветки была, как мы уже говорили, 100 микрон (т. е. 0,1 мм). Отчеты производились на высотах 5, 35, 65 и

95 микрон над уровнем доньшка кюветки. Оказалось, что среднее число частиц на высоте 35 микрон составляет половину того, которое было на высоте 5 микрон; число частиц на высоте 65 микрон было равно половине числа частиц на высоте 35 микрон, а число частиц на высоте 95 микрон равнялось половине числа частиц на высоте 65 микрон. Иными словами, при поднятии вверх на каждые 30 микрон число частиц в данном объеме (соответствовавшем глубине и ширине выбранного поля зрения) уменьшилось вдвое. Поэтому математический закон убывания плотности (числа зерен в данном объеме) с высотой может быть выражен так: если высоты образуют арифметическую прогрессию, то числа зерен образуют геометрическую прогрессию.



Распределение зернышек гуммифута по высоте (рисунок, составленный из пяти наложенных друг на друга фотографических снимков).

Такой закон убывания плотности зерен с высотой должен был сильно поразить и заинтересовать Перрена: ведь по такому же самому закону спадает плотность при поднятии в нашей атмосфере. Блэз Паскаль, знаменитый французский ученый, живший в XVII столетии и впервые применивший к изучению атмосферы барометр, изобретенный итальянцем Торричелли обнаружил закон, по которому спадает с увеличением высоты плотность атмосферного воздуха. Этот закон, получивший название барометрической формулы, гласит то же самое: плотность каждого из газов, составляющих атмосферу, убывает вместе с увеличением высоты в геометрической прогрессии.

Так например, при поднятии на 5 км количество кислорода, находящегося в кубическом сантиметре, уменьшается

вдвое; при поднятии на следующие 5 км оно уменьшается еще вдвое и т. д. и т. д. Это — тот же самый закон, по которому уменьшается с высотой число зернышек гуммигута в кубическом сантиметре эмульсии, но только здесь иные масштабы — вместо 30 микрон здесь мы имеем 5 км. Отчего же здесь получаются другие масштабы? Достаточно посмотреть что будет, если вместо кислорода исследовать какой-нибудь другой газ атмосферы, например углекислый газ или азот. Для того, чтобы количество углекислого газа на кубический сантиметр уменьшилось вдвое, нужно подняться не на высоту 5 км, а всего только на высоту 3,6 км, т. е. на высоту в 1,37 раз меньшую. Но во столько же раз (в 1,37 раз) молекула углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) тяжелее, чем молекула кислорода ( $\text{O}_2$ ). Совершенно такое же соотношение получается, если сравнивать кислород не с углекислым газом, а например с азотом или с аргоном. Высота, на которую нужно подняться, чтобы плотность уменьшилась вдвое, обратно пропорциональна весу молекулы данного газа. Например молекула гелия (состоящая только из одного атома He) весит в 8 раз меньше молекулы кислорода. Поэтому, для того, чтобы количество гелия в одном кубическом сантиметре уменьшилось вдвое, нужно подняться не на 5 км, как в случае кислорода, а на 40 км (т. е. в 8 раз больше).

Слой гуммигутовой эмульсии в 100 микрон — это, в сущности, такая же атмосфера, но только состоящая не из молекул кислорода или азота, а из зернышек гуммигута, которые уже достаточно велики, чтобы их можно было видеть в микроскоп. Вследствие большой тяжести этих зернышек (по сравнению с молекулами газа) уменьшение плотности с высотой происходит быстрее, чем в обыкновенной атмосфере, окружающей нашу землю, а именно (в случае гуммигутовых зернышек с диаметром 0,21 микрона) плотность уменьшается вдвое при поднятии на 30 микрон. «Эмульсия, говорит Перрен, — это атмосфера в миниатюре, тяготеющая к земле

В масштабе такой атмосферы высота Альп представилась бы несколькими микронами, а отдельные холмы стали бы равны молекулам». Для нас всего важнее, что молекулы этой миниатюрной «атмосферы» — зернышки гуммигута — могут быть взвешены, а это позволяет вычислить и вес молекул обыкновенного газа. Так Перрен сумел сделать то, что казалось совершенно невозможным — взвесить молекулы и атомы.

Проведем этот нехитрый расчет. Высота, на которой плотность кислорода уменьшается вдвое — 5 км. Высота, на которой плотность гуммигута уменьшается вдвое — 30 микрон. 5 км в 165 миллионов раз больше, чем 30 микрон. Значит вес гуммигутового зернышка с диаметром в 0,21 микрона превышает вес кислородной молекулы в 165 миллионов раз.

Сколько же весит такой гуммигутовый шарик? Это нетрудно рассчитать, если измерить предварительно сколько весит кубический сантиметр гуммигута. При этом расчете не следует забывать, что в опытах Перрена зернышки гуммигута находились в воде, а значит, по закону Архимеда, каждый кубический сантиметр гуммигута терял в весе ровно столько, сколько весит кубический сантиметр воды, т. е. 1 гр. Значит каждый кубический сантиметр гуммигута в воде весил на один грамм меньше, чем в воздухе. В результате всех расчетов (которые мы пропускаем) получается, что вес зернышка (с поправкой на закон Архимеда) был равен

0,000 000 000 000 01 гр.

И это зернышко весит в 165 миллионов раз больше молекулы кислорода. Значит молекула кислорода весит

0,000 000 000 000 000 000 000 05 гр.

А так как молекула кислорода в 32 раза тяжелее атома во-

дорода, то вес атома водорода — этого самого легкого из всех атомов — равен

$$0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 0016\ \text{г}.$$

В грамме водорода содержится следовательно

$$600\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ \text{атомов}.$$

Эти цифры, найденные Перреном, позволили связать употребительную единицу атомного веса — вес атома водорода — с граммом. Вес атома водорода, выраженный в граммах, получился настолько ничтожным, что его никак невозможно себе представить — тем не менее он получился вполне определенным. Атом был взвешен. Важнейшая задача атомной физики была разрешена.

Немыслимо все время писать в виде десятичных дробей все эти ничтожно малые цифры. Поэтому физики придумали иной, более короткий способ их написания. Вместо того, чтобы писать 0,1 пишут  $10^{-1}$ , вместо того, чтобы писать 0,01 пишут  $10^{-2}$ , вместо 0,001 пишут  $10^{-3}$ , вместо 0,0001 пишут  $10^{-4}$  и т. д. и т. д. Поэтому можно сказать, что вес атома водорода в граммах есть произведение числа 1,6 на число  $10^{-24}$ , или короче,

$$\text{вес атома водорода} = 1,6 \cdot 10^{-24} \text{ г}.$$

Таким образом вместо 100 пишут  $10^2$ , вместо 1000 пишут  $10^3$ , вместо 10000 пишут  $10^4$  и вообще вместо единицы с  $n$  нулями пишут  $10^n$ . Поэтому

$$\text{число атомов водорода в одном грамме} = 6 \cdot 10^{23}.$$

Вот какой результат получил Перрен, изучая распределение зернышек в гуммигутовой эмульсии в зависимости от вы-

соты. Но всего любопытнее то обстоятельство, что точно такой же результат был выведен с помощью тех же гуммигутовых шариков, но совершенно иным путем, о котором мы также скажем несколько слов.

Брауновское движение в гуммигутовой эмульсии совершается необыкновенно быстро. Нет никакой возможности проследить за движением отдельного гуммигутового зернышка. Поэтому Перрен и не пытался этого делать, а поступил следующим образом: он отмечал на чертеже положение гуммигутового зернышка через определенные промежутки времени, например через каждые 30 сек, и полученные точки соединял прямыми линиями (хотя на самом деле гуммигутовое зернышко за это время двигалось не по прямой линии, а также по причудливой ломаной кривой). Полученные рисунки дают возможность судить о беспорядочности и хаотичности брауновского движения вообще. Но Перрен снимал эти рисунки не только для того, чтобы получить наглядно иллюстрацию к брауновскому движению. Его интересовала количественная сторона дела. Знаменитый Альберт Эйнштейн, который был тогда еще молодым человеком, написал (в 1905—1906 годах) замечательные работы, где он математически вывел формулу, определяющую для заданного промежутка времени среднее смещение гуммигутового зернышка относительно его первоначального положения в жидкости. Мы не станем здесь приводить эту замечательную формулу; заметим только, что в эту формулу входит величина, равная числу атомов водорода в одном грамме. Поэтому, сравнивая формулу Эйнштейна с рисунками Перрена, определяющими перемещение частицы за каждые 30 сек, можно вычислить эту величину. Так и сделал Перрен и у него получилось, что число атомов водорода в одном грамме равно  $6 \cdot 10^{23}$ , т. е. получилось такое же число, как и раньше.

Совпадение между двумя числами, которые были получены совершенно различными способами, является лучшим доказа-

тельств правильности всех сделанных предположений. Значит, молекулы и атомы действительно существуют, а не только являются удобной для химиков выдумкой. Такое заключение были вынуждены сделать даже те, которые долго и упорно не хотели признавать существования атомов. И даже Оствальд в конце концов должен был в предисловии к своему курсу химии написать следующие слова:

«Теперь я убежден, что в последнее время мы получили опытное доказательство прерывного или зернистого строения материи — доказательство, которого тщетно искала атомистическая гипотеза в продолжение сотен и тысяч лет. Совпадение брауновского движения с требованиями этой гипотезы дает право самому осторожному ученому говорить об опытном доказательстве атомистической теории вещества. Атомистическая гипотеза сделалась, таким образом, научной прочно обоснованной теорией».

Вековой спор между сторонниками и противниками атомов закончился, таким образом, победой сторонников атомной теории. И в настоящее время мы можем с уверенностью утверждать, что все вещи на свете — и вода, и камни, и растения, и животные, и воздух, и железо, и т. д., и т. д., и т. д. — все это состоит из мельчайших невидимых глазу атомов.



## *Глава третья*

### ЭЛЕКТРОНЫ И РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ

В конце XVIII века знаменитый американец Бенджамин Франклин, прославившийся не только своим участием в борьбе британских колоний в Америке за независимость, но и своими электрическими опытами и в особенности изобретением громоотвода, выставил теорию электричества, согласно которой электрические явления вызываются присутствием особого электрического «флюида», находящегося во всех телах природы. Если в каком-нибудь теле электрический «флюид» (электрическая «жидкость») находится в количестве, превышающем некоторую норму, то такое тело кажется нам заряженным электричеством одного знака, а если количество электрической жидкости меньше нормы, то это тело заряжено электричеством другого знака. О самой электрической «жидкости» или электрической «материи» Франклин говорил: «Электрическая материя состоит из частичек, которые должны быть чрезвычайно мелкими, так как они могут проникать в обыкновенную, даже самую плотную материю так легко и свободно, что не встречают при этом заметного сопротивления». Если внимательно прочесть эти слова Франклина, то в них можно увидеть следующие утверждения: 1) существует особая электрическая «материя» или электрический «флюид»; 2) электрический «флюид» состоит из атомов, 3) атомы электрического флюида малы и ничтожно малы даже по сравнению с такими мелкими части-

цами, как атомы обыкновенного вещества, потому что они очень легко и без особенного сопротивления проникают внутрь жидких и твердых тел, в которых атомы плотно упакованы и соприкасаются друг с другом; тем не менее атомы электрического флюида легко шныряют в промежутках между атомами обыкновенных тел (стоит только вспомнить о том, как легко электрический заряд перемещается по металлической проволоке).

Эти идеи Франклина имели чисто умозрительный характер, — это была гениальная догадка, не имевшая в то время никаких серьезных опытных оснований. Но в 1833 году гениальный английский ученый — самоучка Михаил Фарадей открыл замечательный факт, который можно считать подтверждением теории Франклина. Этот факт заключается в следующем: Фарадей изучал явление электролиза, которое было известно уже давно (с последней четверти XVIII века) и которое состоит в том, что пропускание электрического тока через некоторые жидкие тела (расплавленные или растворенные в воде соли, щелочи, кислоты) разлагает эти тела (электролиты) на их составные химические части. Фарадей измерил электрический заряд, проходящий через электролит в течение всего того времени, пока из электролита выделяется определенное количество водорода, или калия, или серебра, или меди и т. п. Обнаружилась замечательная вещь: для того, чтобы из любого электролита выделился грамм водорода, необходимо пропустить через него 96500 кулонов электрического заряда (кулон — единица для измерения электрического заряда, который всегда пользуются электротехники). Иными словами, 1 гр водорода всегда переносит с собой через электролит одно и то же количество электричества, а именно 96500 кулонов. Такое же самое количество электричества, как показали точные измерения Фарадея, переносят с собою и 23 гр натрия, и 35,46 гр хлора, и 39,1 гр калия, и 107,88 гр серебра. Если мы заглянем в список химических

элементов, который был помещен в предыдущей главе, то мы увидим, что эти числа — 1, 23, 35,46, 39,1, 107,88 — являются ничем иным, как атомными весами водорода, натрия, хлора, калия, серебра. Легко сообразить, что в 107,88 г серебра должно содержаться такое же самое количество атомов серебра, сколько атомов водорода имеется в 1 г водорода, сколько атомов калия есть в 39,1 г калия и т. д. и т. д. Значит все эти вещества (водород, калий, натрий и др.) переносят через электролит одно и то же количество электричества на одинаковом числе атомов, откуда сразу же вытекает, что один атом водорода переносит с собою через электролит такой же электрический заряд, какой переносит с собой и атом хлора, и атом серебра, и атом калия. Чему же этот заряд равен? Ясно, что он равняется частному от деления всего заряда 96500 кулонов, который переносится одним граммом водорода, на число атомов в грамме водорода. Попробуем записать это в виде математического уравнения (эта книжка написана так, что для ее чтения не нужно знать никакой сложной математики; поэтому пусть читатель, незнакомый с математикой, не пугается: от него требуется только, чтобы он умел применять четыре правила арифметики и десятичные дроби и знал, что величины иногда обозначаются буквами). Итак, обозначим заряд, который переносится через раствор электролита одним атомом водорода, буквой  $e$  (такой же заряд переносится и атомом калия или натрия или серебра). Этот заряд получается от деления 96500 кулонов на число атомов в одном грамме водорода. Поэтому, если обозначить число атомов в одном грамме водорода буквой  $N$ , то выйдет, что  $Ne$  (т. е. произведение заряда  $e$  на число  $N$ ) равно 96500 кулонов. Это, по существу, и есть та формула, которую мы хотели написать, но только ее обыкновенно пишут в несколько измененном виде, а именно вот как: вместо того, чтобы измерять электрический заряд кулонами, как это делают электротехники, физики обыкновенно выбирают дру-

гую единицу измерения, которая в три миллиарда раз меньше кулона. Такая единица называется абсолютной единицей. Ясно, что заряд 96500 кулонов равен  $96500 \times 3\,000\,000\,000$  абсолютных единиц. Если произвести перемножение, а затем применить обычный способ сокращенной записи длинных чисел, которым мы уже пользовались в предыдущей главе, то выйдет, что это произведение равно  $2,895 \cdot 10^{14}$ . Поэтому, измеряя заряд  $e$ , переносимый одним граммом водорода, не в кулонах, а в абсолютных единицах, мы получим

$$Ne = 2,895 \cdot 10^{14} \text{ абс. ед.}$$

Мы говорим, что 1 г водорода и 23,0 г натрия и 35,46 г хлора и 39,1 г калия и 107,88 г серебра переносят через электролит один и тот же электрический заряд, а именно 96500 кулонов, и мы обращаем внимание на то обстоятельство, что числа 1, 23,0, 35,46, 39,1, 107,88 являются как раз атомными весами этих веществ, что можно видеть из таблицы, которая приведена в предыдущей главе. Все это — результаты измерений Фарадея. Но не со всеми веществами у Фарадея получилось то же самое. Когда он стал измерять количество электричества, которое нужно пропустить через электролит, чтобы выделить из него 24,32 г магния или 40,08 г кальция или 65,38 г цинка (эти числа суть атомные веса упомянутых веществ, в чем всякий может убедиться, взглянув на нашу таблицу), то это количество электричества тоже оказалось совершенно одинаковым для всех этих разных количеств вещества: оно одно и то же и для 24,32 г магния, и для 40,08 г кальция, и для 65,38 г цинка, но только оно совсем не равно 96500 кулонов, как мы могли бы ожидать. Измерения Фарадея показали, что оно равно 193000 кулонов, т. е. ровно в двое больше, чем 96500 кулонов. Сообразим, что все это значит. Ведь в 24,32 г магния или в 65,38 г цинка содержится столько

же атомов, сколько в одном грамме водорода. Но эти атомы переносят с собою не такое количество электрического заряда, какое переносит с собою один грамм водорода, а ровно вдвое больше. Значит и каждый атом магния или цинка или кальция переносит с собою не такой электрический заряд, какой переносит через электролит один атом водорода, а ровно вдвое больше, т. е. не  $e$ , а  $2e$ . Итак, из измерений Фарадея вытекает следующее:

1) Каждый атом водорода или натрия, или кальция или серебра и т. д. переносит с собою через электролит количество электричества равное  $e$ .

2) Каждый атом магния или кальция или цинка и т. д. переносит с собою через электролит количество электричества равное  $2e$ .

Аналогичные измерения Фарадей проделал и для целого ряда других химических элементов, и при этом всегда оказывалось, что один атом любого химического элемента при прохождении через электролит несет с собою электрический заряд, который может быть равен или  $e$ , или  $2e$ , или  $3e$ , или  $4e$  и т. д., но никогда не может быть равен дробному числу  $e$ , например заряду  $e$ , помноженному на целое число с половиной. Заметим, что сам Фарадей, формулируя открытый им количественный закон электролиза, ничего не упоминал об отдельных атомах, а только говорил, что если взять число граммов водорода или калия или натрия и т. д., равное их атомному весу, то это число граммов рассматриваемого химического элемента переносит с собою через электролит всегда один и тот же заряд, а именно 96500 кулонов; а если сделать то же самое с кальцием или с магнием, то получится не 96500 кулонов, а ровно вдвое больше и т. д. и т. д.

Все это очень легко перевести на язык атомов, как это мы и сделали выше, но впервые это сделал не Фарадей, а ирландский физик Джонстон Стони в 1874 году, через сорок лет после Фарадея. Еще более ясную форму придал этим

соображениям знаменитый немецкий физик Германн фон-Гельмгольтц, который в 1881 году прочитал в Лондоне, в Королевском Институте, лекцию, посвященную памяти Фарадея. В этой лекции он очень отчетливо выразил ту мысль, что существует некоторая «порция» электрического заряда, равная  $e$ , и что атом вещества, проходящий через электролит, может нести на себе или одну такую порцию, или две, или три такие порции, но никак не дробное число и не целое число с дробью. Заряд  $e$  — элементарная порция электрического заряда или «элементарный электрический заряд» — как обыкновенно говорят — является чем-то вроде атома электричества: ведь для понятия атома всего характернее, что он не делится на части, а встречается — по крайней мере в какой-то определенной области явлений — только в целом виде, так что можно отделить от вещества один атом, или два, или три, или четыре и т. д., но не дробную часть атома и не целое число с дробью. Вот каким образом возродилась старая мысль Франклина об «атомах электрического флюида». В своей фарадеевской лекции Гельмгольтц говорил: «Самым поразительным следствием закона Фарадея является, быть может, следующее: если мы примем гипотезу, что обыкновенные вещества состоят из атомов, то мы не сможем избежать и того заключения, что электричество как положительное, так и отрицательное, тоже состоит из определенных элементарных порций, которые ведут себя как атомы электричества».

Чему равна величина заряда такого «атома электричества»? На этот вопрос Гельмгольтц не сумел бы ответить. Он сказал бы только, что элементарный электрический заряд  $e$  связан с числом  $N$  (числом атомов в одном грамме водорода) уравнением

$$Ne = 2,895 \cdot 10^{14} \text{ абс. едйн.}$$

и что если ему скажут, чему равен множитель  $N$ , то только тогда он сумеет сказать, чему равно  $e$ . В предыдущей главе

мы видели, что изучение брауновского движения, произведенное Перреном, дает ответ на вопрос о том, чему равно  $N$ : мы видели, что  $N = 6 \cdot 10^{23}$ . Но в 1881 году, когда Гельмгольц написал это уравнение, число  $N$  известно не было; о нем можно было только догадываться. Заметим, что связь  $N$  с  $e$  двусторонняя: если нам скажут, чему равно  $N$ , то мы вычислим из нашего уравнения  $e$ , но ведь совершенно таким же образом, если мы сумеем каким-нибудь образом узнать и измерить  $e$ , то из нашего уравнения мы вычислим, чему равно  $N$ , т. е. число атомов в грамме водорода — иными словами, чему равен вес водородного атома. В конце этой главы мы увидим, каким образом действительно удалось показать на опыте, что электричество состоит из неделимых порций, и измерить величину такой порции. Это дало возможность вычислить с помощью нашего уравнения вес водородного атома, и в результате получилось такое же самое число, какое по совершенно другому способу уже получил Перрен.

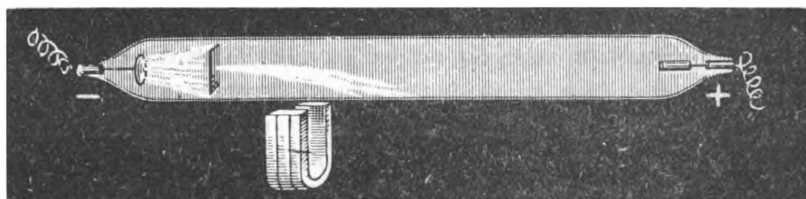
Из рассуждений Гельмгольца и Стони как будто вытекало, что электрический заряд действительно состоит из каких-то «атомов электричества», как предположил чуть ли не за столет до этого Бенджамен Франклин. Но все-таки это заключение еще не было достаточно убедительным. Необходимо было выделить «атомы электричества» в чистом виде, освободив их от обыкновенных атомов вещества; необходимо было найти физическое явление, в котором «атомы электричества» принимали бы такое непосредственное участие, чтобы стало возможным открыть их и изучить их свойства. Это удалось ученым, изучавшим прохождение электрического тока через разреженные газы.

В стеклянный сосуд, из которого выкачан почти весь воздух (так что остающийся там воздух производит давление не больше тысячных долей миллиметра ртутного столба) впаяны две металлические пластинки, соединенные с полюсами источника постоянного тока. Будем называть пластинку, соединен-

ную с отрицательным полюсом, катодом, а с положительным — анодом. В 1869 году немецкий физик Плюккер открыл, что если при таком сильном разрежении пропускать электрический разряд между катодом и анодом, то с поверхности катода выходят особые лучи, заставляющие светиться те части стеклянных стенок сосуда, на которые они падают. Таинственные лучи, открытые в 1869 году Плюккером, служили после него предметом исследования целого ряда ученых, в особенности Гитторфа, Гольдштейна (давшего им название катодных лучей) и других. В 1874 году гениальный английский ученый Крукс прочел в Шеффилде доклад под заглавием «Лучистая материя или четвертое состояние вещества», в котором высказал смелую гипотезу о том, что катодные лучи представляют поток материальных частиц, движущихся с колоссальной скоростью и заряженных отрицательным электричеством. Эти частицы, по мнению Крукса, входят в состав каждого химического атома. Таким образом они представляют «осколки» атома, который, следовательно, не может уже считаться «неделимым» в обычном узком смысле этого слова. Высказав эту гипотезу, Крукс тем самым посягнул на считавшееся тогда несокрушимой основой химии мнение о том, что атомы абсолютно неделимы и являются последними и неразрушаемыми единицами, из которых построены все тела природы. Неудивительно, что смелая мысль Крукса сначала не встретила особой поддержки. Даже такие выдающиеся ученые как Генрих Гертц (открывший электромагнитные волны) нападали на Крукса, утверждая, что катодные лучи представляют не поток материальных заряженных частиц, а особого рода волны, распространяющиеся в эфире; многие считали Крукса сумасшедшим. Однако Крукс оказался прав, и постепенно весь ученый мир под давлением неопровержимых фактов вынужден был принять мнение Крукса. То, что катодные лучи представляют быстро движущиеся заряженные частицы, доказывается следующими опытами.



Если к стеклянному сосуду, в котором распространяются катодные лучи (такие сосуды называются разрядными или кручковыми трубками), приблизить магнит, то катодные лучи определенным образом искривляются. Это было бы совершенно необъяснимо, если бы эти лучи представляли собой волны, но становится совершенно понятным, если мы только допустим, что катодные лучи — это быстро движущиеся заряженные частицы. Движущийся электрический заряд есть



Искривление катодных лучей в магнитном поле.

не что иное как ток, а магнитное поле, как известно, действуя на ток, заставляет его отклоняться (проводник с электрическим током отклоняет магнитную стрелку и, наоборот, сам стремится повернуться в магнитном поле). Направление, по которому происходит искривление пучка катодных лучей, указывает на то, что они заряжены отрицательным электричеством.

Если крушкову трубку поместить не в магнитное, а в электрическое поле, то катодные лучи также искривляются, при этом таким образом, что они стремятся приблизиться к положительно заряженному телу и, наоборот, удалиться от тела, отрицательно заряженного. Это тоже указывает на то, что катодные лучи заряжены отрицательно.

Катодные лучи, как мы уже говорили, вызывают яркую

флюоресценцию (зеленого цвета) в тех местах стеклянной стенки зарядной трубки, куда они падают. Если же на пути лучей поставить какое-нибудь препятствие, например металлический крест, то это препятствие отбрасывает от себя резкую тень: на фоне яркой зеленой флюоресценции стекла видно резкое темное изображение препятствия, например изображение креста. Катодные лучи ведут себя в точности так, как если бы это был поток материальных снарядов, выбрасываемых от катода трубки: при продолжительном обстреле какого-нибудь тела катодными лучами оно заметно нагревается. В некоторых опытах удавалось до-бела раскалить катодными лучами кусок платины и это показывает, что микроскопические снаряды, которыми мы бомбардируем этот кусок платины (частицы или «атомы» катодных лучей), несут на себе большую энергию, движутся с огромной скоростью. Катодные лучи вызывают свечение не только стекла, но и многих других веществ. Пользуясь таким свечением особенно удобно производить опыты с отклонением катодных лучей в магнитном поле: если на пути лучей поставить листок слюды с прорезанной в нем щелью, так чтобы лучи могли пройти только через эту щель, а за слюдой поставить кусок вещества, способного флюоресцировать под действием катодных лучей (все это нужно сперва поместить в разрядную трубку и только затем откачать из нее воздух и запаять ее), то на флюоресцирующем веществе вспыхнет яркая полоска — точное геометрическое изображение щели. Помещая разрядную трубку в поле какого-нибудь электромагнита, мы можем заставить это светящееся изображение щели передвинуться — направо или налево, в зависимости от направления магнитного поля. Именно из таких опытов физики и узнали, что «лучистое вещество» (как говорил Крукс), из потоков которого состоят катодные лучи, заряжено отрицательным электричеством.

Если на пути катодных лучей поставить какое-нибудь

легкоподвижное тело (напр. очень легкую вертушку), то катодные лучи, падая на это тело, приведут его в движение. Это тоже указывает на их материальную природу.

Когда Гельмгольц и Стони нашли, что электричество состоит из «порций» или «атомов», то естественно было заключить, что движущиеся в катодных лучах частицы и представляют собой атомы отрицательного электричества. В 1891 году Стони предложил называть их *электронами*. Итак катодные лучи — это поток отрицательно заряженных электронов. Катодные лучи — это и есть «электрический флюид» Франклина, выделенный из обыкновенного вещества и полученный в чистом виде, в котором его удобно изучать.

Наиболее замечательные исследования катодных лучей произвел английский физик сэр Дж. Дж. Томсон. Томсон исходил вот из какой идеи: если поместить разрядную трубку с катодными лучами в электрическое или в магнитное поле, то лучи, как мы знаем, искривляются. Это объясняется тем, что электроны, из которых состоят катодные лучи, испытывают в электрическом и в магнитном поле ускорение. От чего зависит величина этого ускорения? Если заряженная частица находится в заданном электрическом поле, то ее ускорение будет тем больше, чем больше ее заряд, и тем меньше, чем меньше ее масса. Говоря математически, ускорение, испытываемое заряженной частицей в электрическом поле, прямо пропорционально ее заряду  $e$  и обратно пропорционально ее массе (весу)  $m$ , иными словами оно пропорционально дроби  $e/m$ . (Нужно обратить особое внимание на то обстоятельство, что движение частицы в поле зависит только от отношения  $e/m$ , а не от числителя  $e$  и знаменателя  $m$  в отдельности: если бы мы, например, увеличили в десять раз заряд частицы, то все действующие на нее силы увеличились бы в десять раз. Но если при этом мы во столько же раз увеличим и ее вес (массу), то действие силы останется тем же,

хоть сила увеличилась в десять раз). Если же частица находится не в электрическом, а в магнитном поле, то испытываемое ею ускорение зависит не только от отношения  $e/m$ , но и от ее скорости. Поэтому Томсон придумал сделать следующее: он заставил горизонтальный пучок катодных лучей перпендикулярно падать на расположенную вертикально фотографическую пластинку. Затем он включил электрическое поле такого направления, чтобы оно могло отклонять след падения катодных лучей на фотопластинке вправо или влево, а также включил и магнитное поле, направленное так, чтобы оно могло смещать этот след вверх или вниз. Смещение следа на фотопластинке в направлении вправо и влево и смещение того же следа в вертикальном направлении зависело от  $e/m$  и от скорости электронов катодных лучей. Измерив горизонтальное и вертикальное смещение следа падения электронов на фотографическую пластинку, Томсон смог написать два уравнения с двумя неизвестными, а именно с неизвестной дробью  $e/m$  и неизвестной скоростью. Эти два уравнения с двумя неизвестными Томсон решил. Что же оказалось? Оказалось, что скорость электронов катодных лучей бывает в разных случаях разная: она зависит от того, какое электрическое напряжение (сколько вольт) дано между катодом и анодом трубки. Например, если дано 1000 вольт, то скорость электронов будет около 18000 км/сек; если дано 250 вольт, то скорость будет 9000 км/сек и т. д. Это — невообразимо огромные скорости, если сравнить их с обычными скоростями окружающих нас тел — скоростью поезда, скоростью артиллерийского снаряда — но они не выглядят такими же внушительными с точки зрения физика, который привык встречаться в своих расчетах и с гораздо большей скоростью — со скоростью света, которая равна 300 000 км/сек (это — та самая скорость, с которой доходят до нас лучи света, посылаемые солнцем и звездами: чтобы дойти до земли от солнца, находящегося на расстоянии 150 миллионов километров от нас,

лучи света должны пробегать это расстояние в течение 500 сек). Поэтому физики не очень удивились, когда Томсон опубликовал свой результат измерения скорости катодных лучей: все сочли эту скорость сравнительно скромной по величине. Гораздо интереснее было то, что Томсон сообщил о найденном в его опытах значении дроби  $\frac{e}{m}$ . Из его измерений вытекало, что дробь  $\frac{e}{m}$  получается (в отличие от скорости) всегда и всюду одинаковой. Во всех опытах с катодными лучами она неизменно оказывалась равной

$$\frac{e}{m} = 5,307 \cdot 10^{17} \text{ абс. едн.}$$

если  $e$  выражено в абсолютных единицах, а  $m$  (вес или масса электрона) в граммах. Это было хорошим подтверждением догадки Крукса о том, что катодные лучи — это поток каких-то совершенно одинаковых частиц.

Из этого значения  $\frac{e}{m}$  Томсон сейчас же вывел совершенно поразительное следствие. Вспомним, что из фарадеевских законов электролиза мы получили, что

$$Ne = 2,895 \cdot 10^{14} \text{ абс. едн.}$$

Но что такое  $N$ ? Это — число атомов водорода в одном грамме водорода. Значит водородный атом должен весить одну  $N$ -ую часть грамма. Если мы обозначим вес (массу) водородного атома буквой  $M$ , то окажется, что  $M = \frac{1}{N}$ . Поэтому помножить какое-нибудь число на  $N$  — это все равно, что разделить его на  $M$ , и наоборот. Выходит, что фор-

малу  $Ne = 2,895 \cdot 10^{14}$  абс. ед. можно еще написать в виде

$$\frac{e}{M} = 2,895 \cdot 10^{14} \text{ абс. ед.}$$

Таким образом, число  $2,895 \cdot 10^{14}$  есть отношение элементарного электрического заряда (т. е. заряда электрона), выраженного в абсолютных единицах, к весу водородного атома, выраженного в граммах. А число  $5,307 \cdot 10^{17}$  есть отношение того же самого заряда электрона к весу уже не водородного атома, а самого электрона. Число  $5,307 \cdot 10^{17}$ , как нетрудно сосчитать, примерно в 1840 раз больше числа  $2,895 \cdot 10^{14}$ . Что это значит? У двух дробей  $\frac{e}{m}$  и  $\frac{e}{M}$  числители одинаковы, а между тем первая дробь в 1840 раз больше второй. Значит знаменатель первой дроби в 1840 раз меньше, чем знаменатель второй дроби. Иными словами электрон в 1840 раз легче атома водорода, т. е. чуть ли не в две тысячи раз легче самого легкого из атомов. Итак, атом водорода не есть самая легкая частица в мире, как мы думали до сих пор: электрон еще гораздо легче его.

Для того чтобы понять всю огромную важность этого результата, полученного впервые Дж. Дж. Томсоном, вспомним следующее: в явлениях электролиза мы имеем дело с атомами, заряженными положительным и отрицательным электричеством, причем заряд каждого атома может равняться по величине одному или двум или трем и т. д. зарядам электрона. Электрон играет роль того «атома электрической жидкости», о котором говорил старик Франклин. Легко понять, каким образом атом вещества может иметь один или два или три отрицательных элементарных заряда: для того, чтобы зарядить атом таким отрицательным зарядом, стоит только приклеить к нему один, или два, или три и т. д. электрона. Но

как зарядить атом одним, или двумя, или тремя положительными зарядами? Для этого необходимо отнять у атома отрицательный заряд: ведь отнять отрицательный заряд — это все равно, что прибавить положительный. Значит нужно отнять у атома один, или два, или три и т. д. электрона. Выходит, что атом водорода, переносащий на себе в электролите один положительный элементарный заряд, — это есть атом водорода, у которого отнят электрон. Атом цинка, несущий два положительных элементарных заряда — это атом цинка, у которого отняты два электрона и т. д. и т. д. Но для того чтобы можно было отнять у атома электроны, необходимо — так, по крайней мере, говорит здравый смысл — чтобы они у него были.

Таким образом мы приходим к взгляду на атом, как на какую-то сложную систему, в состав которой входят электроны. У атомов можно оторвать один или несколько электронов — при этом образуется положительно заряженный «ион» (отрыв электронов от атома принято называть ионизацией, а заряженный атом, который при этом образуется, — ионом: это греческое название, которое значит «передвигающийся», так как ведь заряженный атом получает способность передвигаться в электрическом поле, чем и объясняется, например, передвижение атомов при электролизе). Если к атому добавить один или несколько электронов — получается отрицательно заряженный ион. Все эти представления очень сильно отличаются от тех представлений, которые были у Дальтона: ведь Дальтон считал, что атом является абсолютно неделимым на части, а теперь оказывается, что от атома сравнительно легко откалываются электроны. В сущности говоря, весьма забавно, что физические открытия в конце XIX и в начале XX века, те самые открытия, которые наконец-то дали физике убедительные доказательства реального существования атомов, вместе с тем поставили крест на старинной идее неделимости атомов: физики столк-

нулись с явлениями, в которых принимают участие осколки атомов — электроны. Атомы существуют, но совсем не обладают свойством неделимости. По этому поводу следует сказать, что уже Франклин, говоря об атомах электрического «флюида», тоже предполагал, что их можно извлекать из обыкновенных атомов вещества и прибавлять к обыкновенным атомам. Различие заключается в том, что «атомы электрической жидкости» у Франклина считались невесомыми, а на самом деле оказалось, что они обладают весом, хотя и очень маленьким (в 1840 раз меньше, чем вес самого легкого атома). Поэтому, строго говоря, если мы от какого-нибудь атома отрываем один или несколько электронов, то вес его уменьшается; если же заряжаем его отрицательно, т. е. придаем один или несколько электронов, то его вес увеличивается. Однако не следует забывать, что электрон весит во много раз меньше, чем даже самый легкий атом: если электрон и не оказался невесомым, как думал о нем Франклин, то все же мы можем его считать «почти невесомым». Вот почему, когда от атома оторван один или несколько электронов, то мы не будем называть этот атом расколотым на части: было бы смешно употреблять это выражение, когда отколотые от атома куски весят в несколько тысяч раз меньше, чем то, что осталось — ведь мы же не говорим, что человек разрезан на части, когда ему обрили голову или остригли ногти, и именно потому, что вес отрезанных волос или ногтей во много раз меньше веса человека. Может ли существовать такой «тонкий и сильный агент» — как говорил в XVII столетии Роберт Бойль — с помощью которого удалось бы действительно раздробить атом на части, т. е. оторвать от него осколок, не обладающий столь ничтожным весом, как электрон, — об этом мы узнаем в одной из следующих глав этой книжки.

Итак, электроны, из которых состоят катодные лучи, являются вместе с тем обычной составной частью любого химиче-



ского атома. Такое заключение сделал Томсон в полном согласии с гениальной гипотезой Крукса, и все развитие физики в конце XIX и в начале XX столетия приносило все новые и новые подтверждения этого взгляда. Уже давно было известно, что все вещества обладают, в той или иной степени, магнитными свойствами, и еще в первой половине XIX столетия французский математик и физик Ампер объяснил магнитные свойства вещества тем, что атомы и молекулы окружены особыми электрическими токами. Теперь, после открытия электрона, эти «молекулярные токи» Ампера приняли гораздо более определенный и конкретный характер: для того, чтобы объяснить существование этих токов, было достаточно предположить, что электроны, находящиеся внутри атомов, движутся; движение электронов — это и есть текущий внутри атомов замкнутый электрический ток. Известно было также, что ускоренное, переменное движение электрических зарядов должно вызывать в пространстве электромагнитные волны; в зависимости от длины волны, эти электромагнитные волны воспринимаются нами то как волны радиотелеграфа (когда длина волны составляет несколько метров или даже километров), то как волны видимого света (когда длина волны равна десятитысячным долям миллиметра), то как волны ультрафиолетового света (длина волны еще меньше). После открытия электронов стало ясно, каким образом атом может испускать свет — он испускает свет вследствие того, что в нем электроны совершают неравномерное и переменное движение. Этот естественный и правдоподобный вывод из открытия электронов, сделанный физиками, получил очень сильное подтверждение, когда голландский физик Зееман открыл, что стоит только поместить светящееся вещество в сильное магнитное поле, как сейчас же испускаемые ими спектральные линии делаются двойными или тройными. В 90-х годах прошлого века другой голландский физик Гендрик-Антон Лорентц придумал очень остроумное математическое рассуждение, из

которого вытекало, что так и должно быть в действительности, если спектральные линии испускаются вследствие движения заряженных частичек внутри атома. Мало того, Лорентц доказал математически, что из измерений, относящихся к открытому Зееманом явлению, можно вычислить  $\frac{e}{m}$  — отношение заряда к массе для тех заряженных частиц, движение которых внутри атома приводит к испусканию спектральных линий. В результате подсчета получилось совершенно такое же  $\frac{e}{m}$ , какое получил Дж. Дж. Томсон в своих опытах над отклонением катодных лучей в магнитном и в электрическом полях. После этого физики окончательно поверили в то, что те же самые электроны, которые в разрядной трубке мчатся с большими скоростями от металлического катода — те же самые электроны существуют и внутри атомов водорода, железа, серы, золота и всех вообще химических элементов на свете.

Открытие электронов также помогло физикам понять, что происходит в металле, когда по нему проходит электрический ток: способность металлов проводить электрический ток без какого бы то ни было заметного переноса массы и без химического изменения в самом металле получила соответственное объяснение, заключающееся в следующем: в атомах металла существует некоторое количество электронов, которые сравнительно очень легко отрываются от своих атомов, переходя от своего атома к соседнему и т. д. Такие электроны, легко отрывающиеся от атомов металла, получили название электронов проводимости. Они переходят от одного атома к другому, сравнительно легко передвигаясь по всему объему металла. Передвижение таких электронов в металле под влиянием электрического поля — это и есть электрический ток. Мы могли бы сравнить электроны проводимости в металле с воздухом, находящимся в порах какого-либо пористого ве-

щества (например губки): если сделать так, чтобы с одной стороны губки давление воздуха было больше, чем с другой, то воздух начнет продавливаться или просачиваться через губку, причем отдельные частицы воздуха будут описывать весьма извилистые пути, сталкиваясь друг с другом и, в общем, следуя очертаниям пор внутри губки. Поток электронов через металл должен быть похож на такой ток воздуха через пористое вещество, так как скорости отдельных электронов могут быть направлены в какую угодно сторону и только в среднем должно получаться просачивание «электронного газа» через металл.

В этой картине электрического тока, проходящего через металл, наиболее существенным является представление о том, что передвигаются отрицательно заряженные частицы (электроны), а положительно заряженные (остатки атомов, от которых оторваны эти электроны) стоят на месте. Именно так возникает представление об электронном газе, частицы которого (т. е. электроны) шныряют с разнообразными скоростями в промежутках между атомами металла и, время от времени, сталкиваясь с этими атомами, отскакивают от них, как мячики. Если приложить к металлу извне электрическое поле, то все частицы электронного газа получат добавочную скорость в определенном направлении и весь электронный газ будет (более или менее быстро, в зависимости от силы поля) просачиваться в этом направлении, встречая сопротивление со стороны атомов металла. Атомы заставляют электроны отскакивать от них и тем самым приводят к тому, что скорость просачивания электронного газа не растет беспредельно, но достигает некоторой конечной величины. Совершенно понятно также, почему металл нагревается при прохождении электрического тока: сталкиваясь с атомами металла, электроны всячески раскачивают эти атомы, отдавая им ту энергию движения, которую они сами приобрели в электрическом поле. Атомы начинают быстрее колебаться около своих по-

ложений равновесия, а мы воспринимаем это как увеличение температуры металла.

Пожалуй, наиболее непосредственным подтверждением правильности этой картины является замечательный опыт американских физиков Стюарта и Тольмэна, проделанный в 1916 году. Остроумная идея, которая пришла им в голову, заключается в следующем: металлическая катушка, не соединенная ни с каким источником электрического тока, приводится в очень быстрое вращение, а затем ее внезапно и очень резко останавливают. Если в металле действительно существуют «свободные» электроны, т. е. электроны, легко перемещающиеся в промежутках между атомами и шныряющие от одного атома к другому, то после внезапной остановки катушки они будут в течение некоторого (очень короткого) времени двигаться по инерции, в то время как атомы катушки уже успели остановиться, — таким же точно образом, как люди, стоящие в трамвае, невольно делают шаг вперед, когда вагоновожатый слишком резко тормозит вагон. Это значит, что в первые мгновения после остановки катушки по ней будет бежать кратковременный ток; направление этого тока легко предсказать заранее, исходя из того, что отрицательно заряженные электроны будут продолжать бежать вперед по направлению первоначального вращения катушки. Стюарт и Тольмэн измерили такой ток электронов и даже сумели вычислить на основании своих измерений отношение  $\frac{e}{m}$  для тех частиц, передвижение которых в металле создает электрический ток. Это отношение оказалось таким же самым, какое получил Томсон для электронов, входящих в состав катодных лучей в разрядных трубках. Этим был подтвержден тот взгляд, согласно которому электроны катодных лучей ничем не отличаются от электронов, переносящих электрический ток в металле.

Но и задолго до этого опыта Стюарта и Тольмэна не было недостатка в доказательствах того, что внутри металла име-

ются обыкновенные электроны. Одним из таких доказательств был так наз. «фотоэффект». Это явление, впервые открытое Генрихом Герццем (знаменитым изобретателем радиотелеграфа) и подробно исследованное многими другими физиками, заключается в том, что при освещении ультрафиолетовым (а в некоторых случаях и видимым) светом металлы становятся положительно заряженными. Внимательное изучение этого явления показало, что металл потому становится положительно заряженным, что с его поверхности светом вырываются отрицательно заряженные частицы. Дж. Дж. Томсон измерил отношение  $\frac{e}{m}$  для этих частиц по такому же способу, какой он применял раньше к катодным лучам и получил такое же самое значение, как для электронов катодных лучей. Отсюда ясно, что частицы, вырывающиеся из металла при освещении ультрафиолетовым светом, — это есть те же электроны. Другое, еще более эффектное доказательство существования электронов внутри металла заключается в явлении «термоэлектронного испускания», которое открыл Томас Альва Эдисон, изобретатель фонографа и электрической лампы. Особенно подробно исследовал это явление (уже в первом десятилетии этого века) английский физик О. В. Ричардсон. Оно заключается в следующем: если сильно нагреть какой-либо металл, то из его поверхности начинают самопроизвольно выскакивать наружу отрицательно заряженные частицы. Определение  $\frac{e}{m}$  для этих частиц по способу Томсона показало, что это электроны. Число таких электронов, выскакивающих из металла наружу, очень быстро увеличивается с возрастанием температуры металла. Объясняется это явление вот как: среди электронов, находящихся в металле, попадают и такие, которые имеют достаточно большую скорость для того, чтобы, подойдя изнутри к поверхности металла, пробить эту поверхность и выскочить наружу. Для

того, чтобы проскочить через поверхность металла, электроны должны затратить работу; это видно из того, что если бы такая работа была не нужна, то все электроны, пришедшие к поверхности, могли бы выскочить наружу, — в действительности же это под силу только электронам, у которых достаточно большой запас энергии движения. В этом смысле электроны, сидящие в металле, похожи на пойманных рыбок, мечущихся во все стороны в ведре с водой: только тем рыбкам, которые движутся достаточно быстро, удастся выпрыгнуть наружу, прочие же не смогут подпрыгнуть так высоко, чтобы перемахнуть через край ведра. В случае электронов, находящихся в металле, число тех, которые движутся достаточно быстро для того, чтобы суметь выскочить из металла наружу, очень быстро увеличивается при возрастании температуры: при обычных температурах оно настолько ничтожно, что никакого «термоэлектронного испускания» не происходит, но стоит только раскалить металл, как число выскакивающих из него электронов станет очень большим, и «термоэлектронный ток» станет вполне доступен измерению. В некотором смысле это явление очень похоже на испарение жидкости: при повышении температуры число молекул, движущихся настолько быстро, что они смогут преодолеть притяжение остальных молекул и выскочить из жидкости в ее пар, становится все больше и больше, а поэтому нагретая жидкость испаряется быстрее, чем холодная. Явление «термоэлектронного испускания» может поэтому быть названо «испарением электронов». В настоящее время это явление имеет огромное множество технических применений (особенно в технике радиотелефона и радиотелеграфа — стоит только вспомнить о катодных лампах), и с ним хорошо знаком каждый радиолюбитель.

---

Все вышеизложенное не оставляет никакого сомнения в правильности гениальной догадки Крукса о том, что электроны

катодных лучей являются составной частью всех химических атомов. Но исследование катодных лучей привело не только к открытию электронов — этих предсказанных Франклином «атомов электрического флюида» — оно привело также и к другому весьма важному открытию, оказавшему огромное влияние на все дальнейшее развитие физики. Речь идет об открытии рентгеновских лучей.

В 90-х годах прошлого столетия очень многие физики изучали замечательные свойства катодных лучей. При этом делались интересные открытия. Так например немецкий физик Ленард открыл способ изучать катодные лучи вне разрядной трубки. Для этого он проделал в стеклянной стенке трубки «окошечко» для катодных лучей, т. е. отверстие, закрытое металлическим листком, очень тоненьким, но все же способным выдерживать атмосферное давление. Через это окошечко он выпустил из трубки катодные лучи наружу и сумел их изучать в воздухе. Заметим, что воздух оказывается не очень «прозрачным» для катодных лучей: пробежав в воздухе несколько сантиметров, электроны останавливаются, — очевидно, вследствие столкновений с атомами газов, из которых состоит воздух.

Еще более замечательное открытие суждено было сделать другому немецкому физiku — мюнхенскому профессору Вильгельму Конраду Рентгену.

В ноябре 1895 года он совершенно случайно обнаружил, что когда разрядная трубка, в которой от катода бегут катодные лучи, помещена в картонный футляр, экран, покрытый флюоресцирующим веществом, начинает ярко светиться при приближении к этой трубке. Отсюда Рентген заключил, что разрядная трубка испускает особые лучи, невидимые глазу, но свободно проходящие через футляр. Падая на экран, покрытый платиносинеродистым барием, они заставляют его светиться. В первое мгновение Рентген был готов думать, что эти лучи суть лучи Ленарда, т. е. вырвавшиеся наружу ка-

тодные лучи, но он должен был сейчас же отбросить это предположение, потому что лучи Ленарда очень плохо проходили даже через воздух — нескольких сантиметров воздуха было вполне достаточно для того, чтобы их задержать и поглотить, — а эти лучи, наоборот, обладали совершенно удивительной проникающей способностью: они свободно проходили через две сложенные вместе колоды карт, через еловую доску, через человеческую руку и т. д. Исследовав ближе это замечательное явление, Рентген обнаружил, что лучи испускаются той частью стеклянной стенки разрядной трубки, куда падают электроны катодных лучей. Под влиянием ударов со стороны падающих электронов стекло стенки начинает испускать (наряду со своим видимым зеленовато-желтым свечением, о котором мы уже упоминали в первой главе) также и особые невидимые лучи, которые распространяются во все стороны и обладают удивительной способностью проникать на сравнительно очень большую глубину в тела, непрозрачные для видимого света. Такие лучи Рентген назвал «лучами икс», но это название, впрочем, не привилось, и в настоящее время на русском и на немецком языке открытые Рентгеном лучи называются попросту рентгеновскими лучами (англичане и французы продолжают называть их «лучами икс»). Очень скоро Рентген обнаружил, что источником новых лучей может служить не только стекло разрядной трубки, но и всякое другое твердое тело, на которое падают достаточно быстрые электроны. Так как интенсивные и быстрые катодные лучи сильно разогревают всякое тело, на которое они падают, то всего выгоднее взять толстую металлическую пластинку из тугоплавкого металла, например вольфрама, и направить пучок катодных лучей на нее. Так возникла обычная форма «рентгеновской трубки», где против катода действительно располагается такая металлическая пластинка (антикатод), которая и служит источником рентгеновских лучей. (Заметим, что такой металлический антикатод вовсе не флюоресцирует, так



что упомянутая в первой главе гипотеза Беккереля о том, что испускание рентгеновских лучей связано с флюоресценцией, не имеет под собой никакой почвы). На антикатод может быть нанесен слой какого-либо иного вещества. Это важно потому, что, как мы увидим дальше, рентгеновские лучи, испускаемые различными веществами, различны по своим свойствам.

Наиболее замечательные особенности рентгеновских лучей (если не считать их удивительной проникающей способности) заключаются в следующем: они не отклоняются ни в электрическом ни в магнитном полях, откуда следует, что в отличие от катодных лучей они не несут на себе никакого электрического заряда. Падая на способный флюоресцировать экран, они заставляют его светиться. Фотографическую пластинку они чернят совершенно таким же образом, как это делают и видимые лучи света. Проходя через воздух, они делают воздух проводником электричества, так что заряженный электрометр, находящийся в таком воздухе, быстро разряжается (его заряд утекает через воздух), и его листочки спадают. (Таким же свойством, как мы знаем, обладают лучи Беккереля). Каков может быть физический смысл этого замечательного свойства рентгеновских лучей? Для того, чтобы воздух стал проводником электричества, необходимо, чтобы в нем появились какие-то носители электрического заряда, способные передвигаться в электрическом поле. Отсюда следует, что рентгеновские лучи, проходя через воздух или через какой-нибудь другой газ, ионизируют этот газ, т. е. превращают часть его молекул в ионы, отрывая от них электроны. После этого в газе появляются положительные ионы наряду с оторвавшимися отрицательными электронами. Любое заряженное тело, находящееся в таком ионизированном воздухе, начнет разряжаться, потому что оно оттолкнет от себя те заряженные частицы, которые имеют заряд такого же знака, как и это тело, и притянет к себе частицы, заряженные электри-

чеством противоположного знака: притянувшись к нему, эти частицы нейтрализуют (уравновесят, уничтожат) его заряд. Ясно, что, чем интенсивнее рентгеновские лучи, тем сильнее вызванная ими ионизация воздуха и, следовательно, тем быстрее разряжаются в этом воздухе наэлектризованные тела.

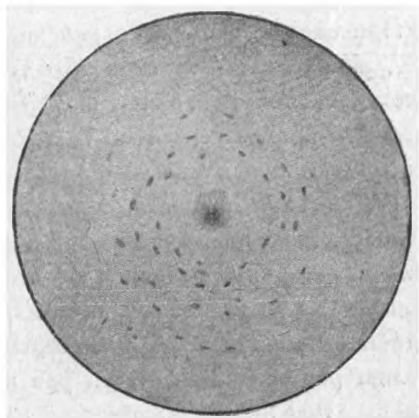
Долгое время физики спорили о том, что же такое представляют собой эти таинственные лучи Рентгена. В конце концов они пришли к заключению, что рентгеновские лучи представляют собой электромагнитные волны такого же рода, как лучи видимого света, но с той лишь разницей, что они обладают во много раз меньшей длиной волны.

Наиболее полное подтверждение эта догадка получила в замечательном явлении, которое было открыто в 1912 году. История этого открытия такова: мюнхенские физики, группировавшиеся вокруг Рентгена, имели обыкновение собираться в свободное время в одном кафе, где между ними происходили оживленные научные споры. Однажды, во время такого спора, один из этих физиков — Лауэ — высказал следующую мысль: «Всем известно — сказал Лауэ, — что обыкновенные лучи видимого света обладают тем свойством, что если взять диффракционную решетку (стеклянную пластинку, на которой очень густо нанесены параллельные и равноотстоящие друг от друга царапины), то свет, отражаясь от такой «решетки», будет не по всем направлениям одинаково ярким: в одних направлениях световые волны будут усиливать друг друга, а в других направлениях они будут друг другу мешать, так что в результате там никакого света не будет. Если рентгеновские лучи похожи на видимый свет, но только имеют гораздо меньшую длину волны, то и для них следовало бы приготовить такую же самую диффракционную решетку, которая дала бы возможность хорошенько изучить их свойства, измерить их длину волны и т. д. Но только такая диффракционная решетка должна быть покрыта царапинами

гораздо более густо, чем обыкновенная решетка для видимых лучей — во столько раз гуще, во сколько раз длина волны рентгеновских лучей меньше, чем видимых лучей. Боюсь, что никакой мастер не возьмется приготовить такую решетку. Но к счастью такие дифракционные решетки для рентгеновских лучей уже существуют в природе, и их можно сразу получить в готовом виде. Я имею в виду кристаллы. Их блестящие грани, их правильные геометрические очертания — все это наводит на мысль о том, что в них атомы расположены правильными рядами, совсем как штрихи в дифракционной решетке». Когда присутствующие выслушали эту речь Лауэ, они решили произвести на другой же день опыт — посмотреть, что делается с рентгеновскими лучами после прохождения их через кристалл поваренной соли или какого-нибудь другого кристаллического вещества. За такой опыт взялся молодой физик П. Книппинг. На другой же день он приступил к работе, но, к несчастью, он расположил фотографическую пластинку не так, как следовало, и после нескольких часов экспозиции он ничего на ней не получил (ему хотелось заставить рентгеновские лучи отразиться от кристалла и свернуть под прямым углом, но этого они на самом деле не делают). Тогда другой физик — В. Фридрих — работавший в соседней комнате, пришел к Книппингу на помощь и поставил пластинку так, чтобы рентгеновские лучи могли падать на нее, пройдя через кристалл насквозь. Результат получился удивительный: вокруг центрального пятна, которое на фотопластинке сделали лучи, прошедшие кристалл насквозь, расположились в правильном порядке черные пятнышки. Пятнышки эти были следами от рентгеновских лучей, отразившихся от внутренних граней кристалла, т. е. от параллельных рядов его атомов. Картина, получившаяся на фотографической пластинке, служила блестящим подтверждением как той мысли, что рентгеновские лучи имеют длину волны, во много раз меньшую, чем видимые лучи, — так и той мысли, что в кристаллах ато-

мы располагаются идеальными правильными рядами, образуя, как говорят, «кристаллическую решетку». Поэтому можно считать, что такие фотографические снимки («рентгенограммы Лауэ») заодно являются убедительным доказательством также и того факта, что атомы действительно существуют, а не являются измышлением «невежественных аптекарей», как говорил Шопенгауер.

Явление, открытое Лауэ, Фридрихом и Книппингом, позволяет убить сразу двух зайцев: 1) исследовать внутреннюю структуру кристаллов, т. е. определить весь строй кристаллической решетки, в которой располагаются атомы твердого тела, и 2) измерить длину волны рентгеновских лучей. Над обеими задачами работали очень многие физики, и в настоящее



Рентгенограмма Лауэ.

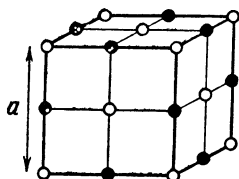
время мы знаем расположение атомов в очень многих кристаллах так же хорошо, как если бы мы видели эти атомы собственными глазами; а измерение длины волны рентгеновских лучей достигло совершенно исключительной точности. Ограничимся немногими примерами: на рисунке на стр. 113 изображено пространственное расположение атомов в кристалле поваренной соли. Темные и белые шарики изображают атомы натрия и атомы хлора. И те и другие атомы образуют кубическую решетку; обе решетки как бы вдвинуты друг в друга. При этом отмеченная на рисунке длина равна  $2,814 \cdot 10^{-8}$  см. Ни один атом натрия не связан с каким-нибудь одним атомом хлора в молекулу, изолированную от всех остальных частиц; поэтому уместно сказать, что весь кристалл поваренной соли

представляет одну гигантскую молекулу. Такие же сведения были добыты и о громадном количестве других кристаллических тел. Заметим также, что многие тела, которые до тех пор считались аморфными (не кристаллическими), оказались «микрористаллическими»: их кристаллы слишком малы, чтобы быть обнаруженными каким-нибудь иным путем, и только рентгеновские лучи дают возможность их исследовать.

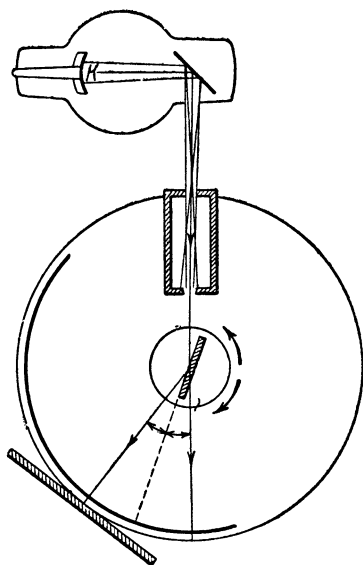
Приведем также несколько числовых данных, относящихся к длине волны рентгеновских лучей. Методы рентгеновской спектроскопии позволяют измерять длину волны лучей примерно в промежутке от  $0,1 \text{ \AA}$  до  $15 \text{ \AA}$ . (Значком  $\text{\AA}$  обозначается единица длины — онгстрем. Один онгстрем равен  $10^{-8} \text{ см}$ ). Точность, с которой возможно измерить длину волны характеристических рентгеновских лучей (см. ниже), совершенно потрясает: после работ шведского ученого Зигбана стало возможным измерять их с точностью до одной стотысячной доли онгстрема, т. е. до  $10^{-13} \text{ см}$ . Длина волны рентгеновских лучей раз в тысячу меньше, чем длина волны лучей видимых: так например кальций имеет в видимом спектре линию с длиной волны  $3933,83 \text{ \AA}$ , а длина волны его наиболее жесткой характеристической рентгеновской линии (см. ниже) равна  $3,36169 \text{ \AA}$ . Из этих чисел видно, насколько широк тот спектр частот электромагнитных колебаний, с которым приходится иметь дело физик: начиная с волн длиной в несколько километров, улавливаемых приборами радиотелеграфа, он простирается до рентгеновских лучей с длиной волны в несколько стомиллионных долей сантиметра. В дальнейшем мы увидим, что существуют волны еще более короткие.

Блестящее открытие Лауэ вызвало работы английских физиков У. Г. Брэгга и У. Л. Брэгга (отца и сына), которые придумали способ фотографировать спектры рентгеновских лучей. Построенный ими рентгеновский спектрограф (см. рисунок) имеет следующее устройство: лучи рентгеновской трубки выделенные в узкий пучок, падают на кристалл и

затем, отражаясь от него, на фотографическую пленку. Кристалл может вращаться, причем с поворотом его меняется конечно и угол, под которым рентгеновские лучи падают на грань, параллельную оси вращения кристалла. Поэтому при поворачивании кристалла процессу отражения подвергаются все новые и новые волны, в результате чего на фотографической пленке разворачивается спектр рентгеновских лучей. Исследование по методу Брэггов спектра рентгеновских лучей, получаемых от обыкновенной рентгеновской трубки, показывает, что кроме непрерывного фона, т. е. лучей с самыми разнообразными и непрерывно-меняющимися длинами волн,



Расположение атомов в кристалле поваренной соли.



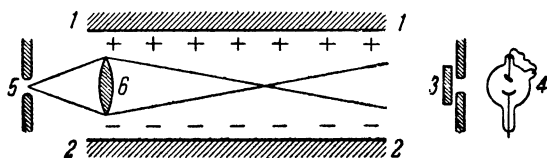
Рентгеновский спектрограф.

в спектре присутствуют еще отдельные резкие линии, выделяющиеся на этом непрерывном фоне. Положение этих линий зависит от того вещества, из которого состоит поверхность антикатода; совокупность этих линий называется *характеристическим спектром* того химического элемента, которому принадлежат эти «характеристические» рентгеновские линии. В 1914 году молодой английский физик Х. Дж. Мозли (в следующем году убитый на войне в Гал-

липоли) исследовал характеристические рентгеновские линии целого ряда химических элементов и обнаружил замечательный факт, который заключается в следующем: если расположить химические элементы в том порядке, в каком они располагаются в периодической таблице Менделеева, и затем рассмотреть их характеристические рентгеновские спектры, то все спектры будут очень похожи друг на друга, и только длина волны спектральных рентгеновских линий будет становиться все меньше и меньше, когда мы будем переходить от одного химического элемента к следующему, затем еще к следующему и т. д. Это убывание длины волны при переходе от элемента к элементу происходит совершенно закономерно по определенному закону, а поэтому, если в списке элементов есть какой-нибудь пропуск (какой-нибудь химический элемент еще не открыт), то это сразу обнаруживается из рассмотрения рентгеновских спектров: при переходе от какого-нибудь элемента к другому элементу, который следует за ним не непосредственно, а с пропуском одного или двух промежуточных элементов, получается чересчур большой скачок в длине волны рентгеновских спектральных линий. По величине скачка можно судить о том, сколько элементов пропущено. На этом открытии Мэзли и основано наше знание периодической системы: именно благодаря этому открытию мы уверены, например, в том, что между неодимом и самарием есть один промежуточный элемент, а не два и т. д. Вот почему мы с уверенностью приписываем самому тяжелому элементу — урану — 92-й, а не какой-нибудь другой номер.

Наш рассказ об электроны и рентгеновских лучах, будет неполон, если мы не расскажем, как американский физик Роберт Эндрю Милликэн, пользуясь ионизирующим действием рентгеновских лучей, сумел измерить заряд электрона совершенно непосредственным способом, как если бы речь шла об измерении заряда какого-нибудь наэлектризованного бузинового шарика.

Способ Милликэна заключался в следующем: в пространство между двумя пластинками 1 и 2 конденсатора (см. рисунок) с помощью особого пульверизатора вбрызгивались мельчайшие капельки масла. Манипулируя заслонкой 3, можно было на короткое время подвергать воздух между пластинками конденсатора действию лучей рентгеновской трубки 4. Как только рентгеновские лучи начинали освещать пространство между пластинами, воздух в этом пространстве ионизировался, и легко могло случиться, что одна из масляных капелек соединится с каким-либо ионом, становясь таким образом заряжен-



Опыт Милликэна.

ной. Если пластины конденсатора не заряжены электричеством, то на такую масляную капельку будет действовать только сила тяжести (т. е. ее вес) и она будет медленно падать (медленно потому, что для тел таких маленьких размеров сопротивление воздуха их движению играет очень большую роль). Освещая пространство между пластинами вольтовой дугой 5, лучи которой собираются в нужную точку выпуклым стеклом 6, Милликэн мог следить в микроскоп за падением масляной капельки. Как только пластины конденсатора заряжались, в движении капельки происходило изменение: если, например, она была заряжена отрицательно, а конденсатор заряжался так, что верхняя пластина получала положительный заряд, то капля начинала притягиваться к верхней пластине и отталкиваться от нижней; поэтому падение капли замедлялось или даже заменялось поднятием. Вес капли, конечно, нельзя было определить простым взвешиванием, но его можно было вычислить, измерив скорость, с которой капля падает в отсут-



ствии электрического поля. Это делается на основании законов гидромеханики, позволяющих рассчитать сопротивление воздуха движению шарообразных капелек различных размеров. Зная скорость, с которой капля падает в отсутствии поля (когда ее заряд не играет роли), и скорость, с которой та же заряженная капля падает в заданном и известном электрическом поле, Милликэн мог вычислить чему равен заряд капли. Оказалось, что в разных случаях заряды капелек бывали различны, но всегда они представляли целое кратное величины  $4,77 \cdot 10^{-10}$  абс. един., т. е. равнялись или просто этой величине, или ей удвоенной, или ей утроенной и т. д., но никогда не равнялись этой величине, помноженной на какое-либо дробное число. Отсюда Милликэн заключил, что величина  $e = 4,77 \cdot 10^{-10}$  абс. ед. представляет наименьшее возможное в природе количество электричества, т. е. «порцию» или «атом» электричества. Эта величина, следовательно, и есть заряд электрона. Точность опытов Милликэна такова, что невероятно ожидать ошибки большей, чем тысячная измеряемой величины. Таким образом величина  $e$  найдена, и это позволяет определить значения и других постоянных.

Ведь мы знаем, что заряд электрона  $e$  связан с числом атомов в грамме водорода ( $N$ ) и с массой атома водорода ( $M$ ) соотношением

$$Ne = \frac{e}{M} = 2,895 \cdot 10^{14} \text{ абс. ед.,}$$

а с массой электрона ( $m$ ) соотношением

$$\frac{e}{m} = 5,307 \cdot 10^{17} \text{ абс. ед.}$$

Так как теперь  $e$  известно, то из этих уравнений можно легко вычислить  $m$ ,  $M$  и  $N$ . Вычисление дает

$$N = 6,062 \cdot 10^{23},$$

что находится в полном согласии с тем результатом, который получил Перрен, изучая брауновское движение. Масса водородного атома оказывается равной

$$M = 1,662 \cdot 10^{-24} \text{ г},$$

а масса электрона

$$m = 9,01 \cdot 10^{-28} \text{ г}.$$

О том, как мала масса электрона, выраженная в граммах, можно судить из следующего сопоставления: отношение веса электрона к весу одного грамма почти в два раза меньше, чем отношение веса грамма к весу всего земного шара. Если великого удивления заслуживает то искусство, с которым физики и астрономы сумели взвесить земной шар и небесные светила, то еще большее удивление должны возбуждать те физические опыты, из которых можно с такой уверенностью (вероятная ошибка не больше одной десятой процента) заключать о массе ничтожного электрона — самой мелкой единицы, входящей в состав материальных тел.

Всего поразительнее во всем этом то обстоятельство, что заключения о заряде и о массе электрона сделаны не на основании каких-либо очень специальных и натянутых гипотез — напротив, эти заключения можно считать весьма прямыми и непосредственными следствиями наблюдаемых явлений: ведь наблюдения Милликэна относились к отдельным электронам (заряд капли во многих опытах равнялся величине  $e$  или ей удвоенной, утроенной и т. д.). Эти опыты являются убедительнейшим доказательством реальности электронов и атомов. Всего убедительнее в этом доказательстве полное совпадение, которое существует между результатами опытов Милликэна и результатами опытов Перрена: ведь те и другие опыты основаны на совершенно разных идеях и на первый взгляд ничего не имеют общего друг с другом. Числам, полученным из этих опытов, приходится верить, — по той же самой причине, по которой на суде верят двум свидетелям, если они, не имея никакой возможности предварительно сговориться друг с другом, оба утверждают одно и то же.

## *Глава четвертая*

### РАЗГАДКА РАДИОАКТИВНОСТИ

**М**ы знаем теперь, что все вещи состоят из атомов и что атом не является чем то абсолютно неделимым: напротив того, атом — это какая-то сложная система, от которой могут отделяться крохотные части — отрицательно заряженные электроны. Таков, в общих чертах, был тот запас знаний, которым обладали физики на рубеже XIX и XX столетий. И, опираясь на этот, в сущности очень скудный, запас знаний о веществе, физики должны были разгадать самую головоломную загадку, которая отпугнула бы от себя самого самонадеянного сыщика на свете, — разгадку радиоактивности.

Мы возвращаемся к нашей детективной истории.

Самое поразительное, самое чудесное в радиі — это его неутомимость. Днем и ночью, зимой и летом, без усталы, без передышки радиі посылает в пространство свои невидимые лучи. Каждый час грамм радиа испускает столько тепла, сколько нужно, чтобы растопить примерно полтора грамма льда. Много ли это? Это не очень много: грамм угля, сгорая, испускает тепла почти в пятьдесят раз больше, но зато он ведь сгорает и перестает быть углем, а грамм радиа, испуская тепло в течение часа, в течение суток, в течение года, остается совершенно таким же, каким был раньше — его способность испускать лучи Беккереля и вместе с ними энергию остается прежней, и он, как и раньше, готов безостановочно

испускать энергию в течение новых и новых лет. Вот это-то и есть самое неслыханное, самое беспримерное из всего, что физикам когда-либо приходилось слышать и видеть. Когда топится печка, в ней сгорают дрова, и если не подбрасывать дров, печка погаснет. Когда идут часы, в них все время раскручивается пружина или опускается гиря, и если их не заводить, они остановятся. Во всей природе только радий оказывается каким-то странным исключением: ничего в нем не тратится, ничего не сгорает, никогда он не стареет, он вечно молод. Он похож на волшебный кошелек в старой сказке — сколько раз ни вынимать из такого кошелька золотую монету, в нем всегда остается еще одна.

Другой, не менее странный факт, относящийся к радю, — это его полная независимость от внешних влияний, полное равнодушие к ним. С тех пор как радий впервые был получен в лаборатории, физики неоднократно пробовали повлиять на его радиоактивность, применяя самые разнообразные способы, но ни сильный жар, ни сильный холод, ни самые высокие давления, какие только можно осуществить средствами современной техники, — ничего не оказывало влияния на радиоактивность: лучи, испускаемые радием, не становились ни сильнее, ни слабее. Для того, чтобы охарактеризовать то огромное впечатление, которое произвели на физиков оба эти свойства радия — его неутомимость и его равнодушие ко всем внешним воздействиям, — достаточно процитировать слова, сказанные одним из первых исследователей радиоактивности (Содди): «В крошечном кусочке радия нет ничего, что напоминало бы громадные масштабы и размеры вселенной, а между тем он выделяет энергию в такой пропорции, в какой ее не выделяет ни солнце, ни одна из звезд. Предположим, например, что наше солнце вместо тех веществ, из которых оно состоит теперь и которые, как нам известно из спектрального анализа, входят и в состав земли, состояло бы из чистого радия. Если допустить, что каждая частица такого солнца выде-

ляет энергию в той же пропорции, что и равная ей по массе частица радия, то нетрудно будет учесть количество выделяемой им энергии. Короче говоря, количество света и теплоты, выделяемых таким солнцем, было бы в миллион раз больше, чем теперь.<sup>1</sup> Еще и по другой причине наша мысль почти бессознательно обращается от радия к высшим явлениям вселенной: ведь только в отношении этих явлений мы оказываемся в положении зрителей, бессильных влиять на них и управлять ими. Все могущественные ресурсы современной лаборатории — крайние пределы тепла и холода, а также давления, сильные химические реактивы, действие сильных взрывчатых веществ, наиболее сильные электрические поля — не влияют на радиоактивность радия и на количество выделяемой им энергии ни в малейшей степени. Радий черпает свои запасы энергии из неизвестного до сих пор источника и подчиняется неоткрытым пока законам. Есть что-то сверхестественное в его отделенности от окружающей среды и в его безразличии к ней. Он как будто принадлежит другим мирам за пределами нашего, питается тем же неугасимым огнем и движется тем же неподдающимся контролю механизмом, который поддерживает свет великих солнц в мировом пространстве в течение безграничных периодов времени. Крупинка радиоактивного вещества, которую мы держим в руке, напоминает многие из старинных тайн, давно позабытых».

В лабораториях всего мира физики жадно набросились на изучение радиоактивности. Можно смело сказать, что в это

---

<sup>1</sup> Как ни странно звучит это утверждение, тем не менее оно совершенно справедливо. Попробуем проверить его. По измерениям астрономов наше солнце испускает в каждую секунду  $9 \cdot 10^{25}$  калорий энергии (калория — это то количество энергии, которое тратится на нагревание одного грамма воды на один градус Цельсия). Каждый грамм радия испускает энергию в количестве около 0,04 калорий в секунду. Известно, что солнце весит  $2 \cdot 10^{33}$  гр. Значит, если бы оно состояло из чистого радия, то испускало бы около  $0,04 \times 2 \cdot 10^{33} = 8 \cdot 10^{31}$  калорий в секунду. Это почти в миллион раз больше той энергии, которую оно испускает в действительности,

время (в 1900 году или около того) не было ни одного физика на свете, который бы не ломал голову над этой трудной загадкой: что же такое в конце концов эта радиоактивность? Каков ее внутренний механизм, внутренний смысл? Отчего она происходит? И каждый физик, по мере сил, пробовал догадаться о том, каково решение этой загадки. Одни говорили: если радий все время испускает свои лучи и они не становятся от этого слабее, то, значит, он эти лучи, это тепло, эту энергию все время откуда то снова получает. Например, возможно, что во всем пространстве распространяются какие-то лучи, которые свободно проходят через все тела и даже через всю толщу земного шара. Не только мы не видим этих лучей, но их даже не замечает фотографическая пластинка, и только радий имеет особенную способность поглощать эти лучи и затем их испускать вновь, но уже в измененном виде — в виде лучей Беккереля. Выходит, что если сравнить радий с часами, то эти часы на самом деле все время «заводятся», заводятся таинственными лучами, которые поглощаются радием и затем перерабатываются им в лучи Беккереля.

Другие говорили: никаких таких лучей, которыми «заводятся» радий, не существует. В радии все время что-то трясется, но только очень медленно и потому мы этого никак не замечаем. Если бы взять грамм радия и очень долго ждать, десятки лет (а если понадобится, то и сотни), то в конце концов можно будет заметить, что лучи радия стали слабее, чем раньше.

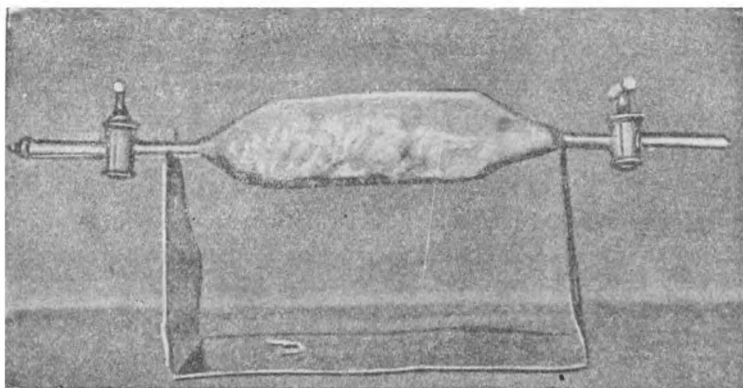
Все это были довольно-таки праздные разговоры, потому что в начале ни та, ни другая сторона ничем не могла доказать свою правоту.

Поэтому оставалось только одно: наблюдать и делать опыты, пока наконец загадка радия не будет разгадана.

В 1900 году многие физики, работая в своих лабораториях, сделали удивительное открытие: они обнаружили, что воздух вокруг вещества, в котором есть хоть немножко радия, тоже

становится радиоактивным. Впервые это заметили Пьер и Мария Кюри, но не они разгадали настоящий смысл этого открытия. Это сделали два молодых англичанина, которые в то время жили в Канаде, в городе Монреаль. Имена этих молодых физиков — Эрнест Резерфорд и Фредерик Содди.

Они сделали такой опыт: взяли стеклянную трубочку и положили туда несколько кусочков виллемита. Виллемит — это

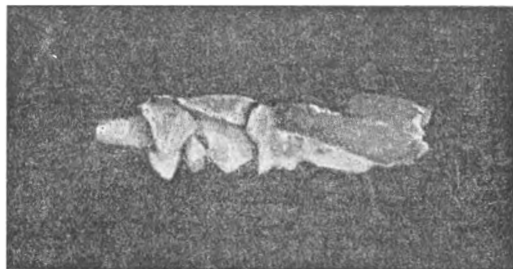


Трубка, наполненная виллемитом для опытов с эманацией радия.

такой камешек, ничем непримечательный с виду, зеленовато-серый, похожий на те гладкие камешки, которые обыкновенно валяются на берегу моря. Но у виллемита есть замечательное свойство: если его освещать лучами радия, то он начинает светиться холодным, ярким зеленым светом. Резерфорд и Содди впустили в свою трубочку с виллемитом воздух, который довольно долгое время находился в соседстве с веществом, содержащим немножко радия. После этого трубочку закрыли с обеих сторон (для этого в ней были с двух сторон устроены краны) и отнесли в темную комнату. И вот, хотя радия поблизости не было, виллемит стал так ярко светиться, что при этом свете можно было даже посмотреть на часы и

прочитать заголовок газеты. Выходит, что воздух в трубочке с виллемитом заставляет виллемит светиться точь в точь так же, как он светился под лучами радия. Как только краны открыли и выдули из трубок этот воздух, виллемит светиться перестал.

Как же объяснить, что воздух, побывавший в соседстве с радием, сам становится радиоактивным? Резерфорду пришла в голову очень простая и очень смелая мысль: он предполо-



Та же самая трубка, сфотографированная в темной комнате благодаря флюоресценции виллемита.

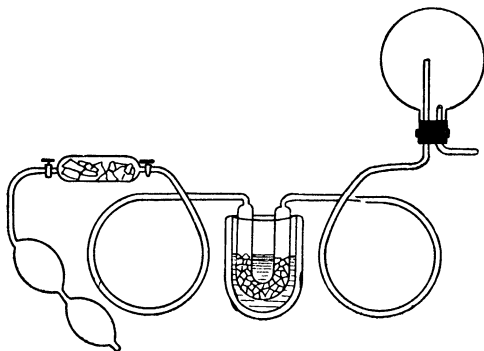
жил, что из радия все время выходит какой-то газ, но не простой газ, а радиоактивный, испускающий лучи Беккереля. Газ этот, попадая в воздух, смешивается с ним. Значит лучи Беккереля испускает не сам воздух, побывавший в соседстве с радием, а новый газ, попавший в воздух из радия.

Этому новому газу Резерфорд дал название «эманация радия» (это название значит «то, что выходит из радия»).

Эманация радия в этих опытах Резерфорда и Содди поступала в воздух в самых крохотных количествах, но все же ее можно было заметить по яркому свечению виллемита. Содди сделал такой опыт: он сфотографировал стеклянную трубку с эманацией и с виллемитом в темной комнате: виллемит сам испускает тот свет, который позволил его фотографи-



ровать. Эта фотография помещена на стр. 123. Но в книжке, которую написал Содди, говорится, что фотография не дает никакого представления о красоте виллемита, светящегося в эманации радия. В своих воспоминаниях Содди говорит, что это одна из самых красивых вещей на свете и что, смотря на свечение виллемита и размышляя о его причинах, он ощущал такие чувства, которые может по настоящему передать только поэт.



Прибор Резерфорда и Содди для демонстрации сжижения эманации радия.

Долгое время физики не хотели верить, что эманация радия есть действительно газ, — такой же, как воздух или как углекислый газ, но только радиоактивный. Например, Пьер и Мария Кюри утверждали, что эманация совсем не простой газ, а что-то среднее между обыкновенным веществом и лучами света. Но Резерфорд и Содди проделали много опытов, чтобы доказать, что эманация есть газ.

Всякий газ можно превратить в жидкость, если только достаточно сильно его охладить. И вот Резерфорд и Содди достали такую холодильную машину, в которой воздух можно сделать жидким. Такая машина теперь имеется в каждой хорошей физической лаборатории: в ней можно осуществить мо-

роз в  $192^{\circ}$  С ниже нуля. При таком холоде воздух делается жидким. Резерфорд и Содди взяли несколько литров жидкого воздуха и сделали следующий опыт: у них был большой пустой стеклянный шар, покрытый изнутри очень легким налетом сернистого цинка. Если бы в этот шар попала эманация радия, то сернистый цинк стал бы светиться под действием лучей Беккереля. Резерфорд и Содди стали вдвухать в этот шар тот воздух с примесью эманации, который у них был заперт в стеклянной трубке с виллемитом. Они вдвухали эту эманацию через длинную трубку, часть которой находилась в сосуде с жидким воздухом. Поэтому в этой части трубки температура была очень низка и эманация никак не могла проскочить через эту часть трубки: она замерзала в ней, превращаясь в жидкость, застревала там, не доходя до стеклянного шара. Всего этого Резерфорд и Содди не могли видеть глазами, потому что не очень-то разберешь, что творится внутри стеклянного колена трубки, засунутого в сосуд с жидким воздухом, да если бы они и могли туда заглянуть, то все равно не смогли бы заметить этих микроскопических капелек жидкой эманации. Но им было совершенно ясно, что дело происходит именно так. Почему им это было ясно? Потому что, когда стеклянное колено трубки лежало в жидком воздухе, эманация не попадала в шар, и шар не светился. Но стоило только вынуть колено из жидкого воздуха, как эманация, нагревшись, через несколько минут снова испарялась и ее легко можно было продуть в шар. Достаточно было один раз нажать рукой на резиновую грушу для продувания эманации, чтобы эманация попала в шар, который сейчас же при этом начинал светиться как фонарь мягким белым приятным светом. При свете этого фонаря Содди мог смотреть на часы.

Что вытекает из всех таких опытов? Из них вытекает, что радий непрерывно выделяет из себя какое-то другое радиоактивное вещество — эманацию радия. Эманация получается в ничтожных коли-

чествах: нужно иметь очень много радия, чтобы собрать эманацию хотя бы с булавоочную головку. Но так как эманация очень сильно радиоактивна, то самую крохотную примесь эманации к воздуху легко заметить по лучам Беккереля, которые она испускает.

И вот Резерфорд и Содди захотели узнать: так же ли эманация неутомима, как радий? Так же ли она продолжает день за днем, год за годом, испускать лучи без всякого заметного ослабления?

Резерфорд и Содди напустили эманацию в трубочку с виллемитом, закрыли оба крана, чтобы она не ушла, и оставили трубочку в темной комнате. Каждый вечер они приходили туда смотреть как светится виллемит. Оказалось, что свечение виллемита с каждым вечером становилось все слабее и слабее. Через четыре дня оно было вдвое слабее, чем раньше. К концу месяца оно почти совсем прекратилось.

Значит эманация радия со временем теряет свои радиоактивные свойства.

Это очень важно. Важно потому, что если радиоактивное вещество эманация радия теряет свои радиоактивные свойства со временем, то вероятно то же самое можно сказать и о всех других радиоактивных веществ. Трудно себе представить, чтобы радий был исключением даже среди радиоактивных веществ. А так как обыкновенное физическое наблюдение не позволяет обнаружить уменьшения радиоактивности радия и урана даже в течение нескольких лет, то остается предположить, что заметное уменьшение их радиоактивности происходит не в течение нескольких дней, как у эманации радия, а в течение огромных промежутков времени, во много раз превышающих самую длинную человеческую жизнь.

Таким образом Резерфорд и Содди установили два факта.

- 1) Из радия непрерывно выделяется радиоактивный газ — эманация радия.
- 2) Радиоактивные свойства эманации уменьшаются с течением времени, и это позволяет высказать гипотезу

тезу, что радиоактивные свойства всех других радиоактивных элементов тоже со временем убывают, хотя это убывание в некоторых случаях может происходить крайне медленно и поэтому почти незаметно.

Каким же образом происходит возникновение эманации и отчего могут уменьшаться радиоактивные свойства радиоактивных элементов?

Для того, чтобы получить ответ на этот вопрос, физики обратились к изучению лучей Беккереля, испускаемых радиоактивными элементами.

Что представляют собой эти лучи, которые как будто бы ничем не отличаются от лучей Рентгена?

В 1899 году Пьер и Мария Кюри попробовали пропустить пучок лучей Беккереля через пространство, в котором было магнитное поле. Это они сделали для того, чтобы узнать — являются ли лучи Беккереля чем-то в роде лучей Рентгена (электромагнитными колебаниями, такими же, как лучи видимого света, но только с гораздо меньшей длиной волны) или же они скорее напоминают катодные лучи, т. е. представляют собой поток очень быстрых движущихся заряженных электричеством частиц.

Результат опыта был совсем неожиданным: в магнитном поле лучи Беккереля расщепились на две части! Одна из них изогнулась в магнитном поле совершенно таким же образом, как искривляются катодные лучи, и при этом в ту же сторону, — только величина искривления была в несколько раз меньше. Что отсюда следует? Отсюда следует, что эта часть лучей Беккереля несет на себе, как и катодные лучи, отрицательный электрический заряд. Поэтому можно было исследовать эти лучи совершенно тем же самым способом, каким Томсон исследовал катодные лучи, т. е. можно было определить для них отношение  $\frac{e}{m}$  и их скорость, наблюдая отклонение лучей в магнитном и в электрическом полях. Эту

работу проделал немецкий физик Кауфман. Он нашел, что отношение  $\frac{e}{m}$  у этих лучей Беккереля такое же, как у электронов катодных лучей. Значит эта (отклонившаяся в магнитном поле) часть лучей Беккереля есть не что иное, как поток электронов, вырывающихся повидимому из атомов радиоактивных веществ. Что касается скоростей этих электронов, то они, как нашел Кауфман, были очень разнообразны, но в среднем они были гораздо больше, чем у электронов катодных лучей. Поэтому и отклонение в магнитном поле было у них не такое большое, как у катодных лучей: действительно, чем быстрее движется заряженная частица, тем труднее магнитному полю сбить ее, отклонить ее от ее первоначального пути.

Наиболее быстрые из электронов, выбрасываемых радиоактивными веществами, оказались движущимися почти со скоростью света (300 000 км/сек)

Итак, часть лучей Беккереля — это просто поток очень быстрых электронов.

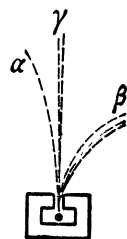
Но кроме этой части была еще и другая часть. Она не отклонялась в магнитном поле и распространялась без всякого изменения направления.

Таков был результат опытов Кюри.

Но в 1903 году Резерфорд доказал, что та часть лучей Беккереля, которую Пьер и Мария Кюри не сумели отклонить в магнитном поле, тоже сложна и состоит из разных частей. Для этого Резерфорд взял очень сильное магнитное поле, гораздо более сильное, чем то, которое было в распоряжении Кюри. В этом сильном магнитном поле та часть лучей Беккереля, которая в опытах Кюри не хотела искривляться, расщепилась на две части: одна из них изогнулась в магнитном поле, но не в ту сторону, в которую изгибается поток электронов, а в противоположную. Значит, это был поток заряженных частиц, но не электронов, а частиц, заря-

женных положительным электричеством. Другая же часть лучей попрежнему продолжала распространяться прямолинейно, не обращая никакого внимания на магнитное поле.

Из этих опытов следует, что лучи Беккереля, испускаемые радием и другими радиоактивными веществами, не однородны, а состоят из трех видов лучей. Всем этим трем видам лучей физики дали название, а именно, обозначили их тремя первыми буквами греческого алфавита: альфа, бета и гамма (альфа, бета и гамма — это названия букв: ведь и у нас когда-то русские буквы имели название, например а, б и в назывались аз, буки, веда).



Альфа-лучами стали называться лучи, состоящие из потока положительно-заряженных частиц, — те самые лучи, которые Резерфорду удалось отклонить магнитным полем от их первоначального направления (в 1903 году).

Бета-лучами стали называться лучи, состоящие из потока очень быстрых отрицательных электронов, которые были отклонены магнитным полем еще в опытах Кюри (в 1899 году).

Наконец гамма-лучами стали называться лучи, которые упорно не хотели изменять своего направления даже и в очень сильном магнитном поле.

Какие существуют еще различия между этими тремя сортами лучей, смесь которых образует лучи Беккереля?

Альфа-лучи гораздо труднее изогнуть в магнитном поле, чем бета-лучи (именно поэтому в первоначальных опытах Кюри удалось загнуть бета-лучи в сторону в таком магнитном поле, которое было еще совершенно недостаточным для того, чтобы заставить альфа-лучи изменить свое направление). Гамма же лучи не изгибаются ни в магнитном, ни в электрическом поле вовсе, точь в точь как лучи Рентгена.

Альфа-лучи легко задерживаются и поглощаются даже

сравнительно очень тонкими слоями вещества. Например, достаточно завернуть радий в обыкновенную писчую бумагу или закрыть его листком слюды или алюминия толщиной в 0,05 мм, чтобы альфа-лучи почти полностью поглотились. А бета- и гамма-лучи проходят через такие листки совершенно свободно. Вообще можно считать, что проникающая способность бета-лучей примерно в 100 раз больше проникающей способности альфа-лучей, а проникающая способность гамма-лучей раз в десять или в сто превосходит проникающую способность бета-лучей. Слой в 5 мм алюминия или в 1 мм свинца достаточен, чтобы задержать большую часть бета-лучей, а гамма-лучи проходят через этот слой еще довольно свободно.

Из-за того, что альфа-лучи так легко поглощаются, возникает вот какое любопытное обстоятельство: если взять какой-нибудь препарат радия и придать ему форму шарика, то он будет испускать сравнительно немного альфа-лучей, потому что большая часть альфа-лучей, испускаемая внутренними слоями этого шарика, успеет поглотиться внутри шарика еще раньше, чем доберется до его поверхности. Поэтому наружу выйдет лишь очень малая доля всех испускаемых альфа-лучей. Но если взять тот же самый препарат и размазать его в виде очень тоненького слоя по какой-нибудь тарелочке или пластинке, то альфа-лучей будет очень много и их действие будет гораздо сильнее, чем действие бета- и гамма-лучей того же самого препарата. С помощью такого препарата можно обнаружить удивительные действия альфа-лучей. Так, например, легко показать на опыте, что альфа-лучи гораздо сильнее ионизуют воздух, чем бета- и гамма-лучи. Содди доказал это следующим опытом: он размазал 1 мг бромистого радия по поверхности платиновой тарелочки (около одного квадратного дюйма). Затем он взял наэлектризованную шелковую кисточку. Эта кисточка служила как бы электрометром:

когда кисточка наэлектризована, все ее нити отталкиваются друг от друга и расходятся в виде конуса, а как только кисточка разрядится, нити снова спадут и будут свисать вертикально. Когда Содди поднес свою наэлектризованную кисточку к размазанному по тарелочке бромистому радю, покрытому сверху листком почтовой бумаги, кисточка оставалась наэлектризованной и ее нити не хотели спадать. Но как только Содди передвинул листок бумаги и приоткрыл небольшую часть поверхности, смазанной бромистым радием, кисточка немедленно разрядилась и ее шелковые нити сейчас же повисли. Значит, бета- и гамма-лучи, испускаемые одним миллиграммом бромистого радия и проходящие сквозь листок бумаги, не действуют на заряженную кисть, а альфа-лучи действуют очень сильно. Когда Содди поднес такую же заряженную шелковую кисть к 30 мг бромистого радия, закрытого листком слюды для поглощения альфа-лучей, то кисточка сложилась, но все же не так быстро, как от действия альфа-лучей, испускаемых лишь одним миллиграммом бромистого радия. Выходит, что альфа-лучи одного миллиграмма бромистого радия ионизируют сильнее, чем бета- и гамма-лучи тридцати миллиграмм того же вещества. Потому-то альфа-лучи и поглощаются так сильно, что их энергия очень быстро расходуется на ионизацию тех веществ, через которые они проходят.

Поглощение альфа-лучей в воздухе и в других веществах тщательно изучил У. Г. Брэгг (тот самый, который впоследствии вместе со своим сыном У. Л. Брэггом построил спектроскоп для рентгеновских лучей). Брэгг нашел, что альфа-лучи каждого радиоактивного вещества проходят в каждой данной среде путь совершенно определенной длины, после чего сразу останавливаются. Поэтому нужно говорить о совершенно определенной «длине пробега» данных альфа-лучей в данном веществе. Это совершенно понятно: положительная частица альфа-лучей, проходя, например, через



воздух, все время ионизует молекулы воздуха, отрывая от них электроны. На ионизацию каждой молекулы она затрачивает определенное количество энергии. Поэтому после каждой ионизации энергия частицы уменьшается на какую-то величину. Наконец, когда весь ее запас энергии будет таким образом исчерпан, она остановится. В одном из своих опытов Брэгг взял стеклянный шар с радиусом 7,5 см и расположил в его центре пластинку с размазанным на ней препаратом радия. Стенки шара были изнутри вымазаны сернистым цинком — это вещество, которое обладает способностью флюоресцировать белым светом, когда на него падают альфа-лучи. Но самые быстрые альфа-лучи, испускаемые препаратом, проходят в воздухе при обыкновенном давлении только 7,1 см. Поэтому они останавливаются не дойдя от центра шара до вымазанных сернистым цинком стенок, и никакого свечения нет. Но стоит только начать выкачивать из шара воздух — при первом же ходе поршня насоса стенки шара начинают светиться. Это значит, что, становясь более разреженным, воздух начинает лучше пропускать альфа-лучи, и их длина пробега таким образом увеличивается и достигает величины 7,5 см. Поэтому они успевают добежать до сернистого цинка и заставить его светиться. При дальнейшем откачивании воздуха свечение сернистого цинка становится все ярче и ярче: это показывает, что альфа-лучи, которые успевают добежать до сернистого цинка, растрачивают на ионизацию воздуха все меньшую и меньшую часть своей энергии.

Что же такое представляют собой эти положительно заряженные частицы, из которых состоят альфа-лучи? Ответ на этот вопрос дал Резерфорд. Он начал с того, что измерил отношение  $\frac{e}{m}$  для этих частиц совершенно таким же образом, как это было сделано для электронов катодных лучей и бета-лучей, т. е. измеряя отклонение лучей электрическим и

магнитным полями. Результат получился следующий:

$$\text{для альфа-лучей } \frac{e}{m} = 1,444 \cdot 10^{-14} \text{ абс. ед.}$$

Однако, из предыдущей главы мы знаем, что для водородного иона, заряженного одним положительным элементарным зарядом, можно написать

$$\text{для водородного иона } \frac{e}{M} = 2,895 \cdot 10^{-14} \text{ абс. ед.}$$

Мы видим, что у альфа-частицы (так мы будем называть положительно заряженные частицы, поток которых выбрасывается радием в виде альфа-лучей) отношение заряда к массе вдвое меньше, чем у водородного иона.<sup>1</sup> Так как заряд электрона или, что то же самое, равный ему по величине (хотя и обратный по знаку) заряд водородного иона в электролите есть «атом электрического флюида» и не может делиться на части, то заряд альфа-частицы может быть или такой же самый, как у водородного иона (и тогда ее масса должна быть в два раза больше), или он может равняться удвоенному заряду водородного иона (тогда масса альфа-частицы должна быть уже не в два, а в четыре раза больше массы водородного иона), или он равняется утроенному заряду водородного иона (тогда масса будет в шесть раз больше массы водородного иона) и т. д. Так как масса водородного иона практически не отличается от массы водородного атома, то получаются следующие возможности: или альфа-частица в два раза тяжелее водородного атома и несет на себе один положительный элементарный заряд; или

---

<sup>1</sup> Числа не вполне сходятся, но это ведь может быть результатом некоторой неточности в измерениях.

альфа-частица в четыре раза тяжелее водородного атома (т. е. весит столько же, сколько атом гелия) и несет на себе два положительных элементарных заряда, и т. д. и т. д.

Какая бы из этих возможностей ни была верна, все равно альфа-частица должна быть сравнительно тяжелой частицей, т. е. иметь массу, близкую уже не к массе электрона, а к массе атомов. Масса альфа-частицы должна превосходить массу электрона по крайней мере в несколько тысяч раз, и, хотя скорость альфа-частиц по измерениям Резерфорда гораздо меньше, чем скорость электронов бета-лучей (по крайней мере в несколько раз), все равно альфа-частица должна обладать гораздо большей энергией движения, чем менее тяжелый электрон, вылетающий из тех же радиоактивных веществ. Альфа-лучи могут быть названы снарядами тяжелой артиллерии радиоактивных веществ; бета-лучи по сравнению с ними — это беглый огонь пулемета.

Поэтому к двум фактам, открытым Резерфордом и Содди и указанным на стр. 126, необходимо прибавить еще и третий необычайной важности факт.

Атомы радия и других радиоактивных веществ испускают из себя весьма быстрые электроны, а также и альфа-частицы, по крайней мере в два раза (а может быть и больше) превосходящие по весу атом водорода.

Когда Резерфорд и Содди собрали и сопоставили эти три факта, то они, как настоящие герои детективной истории, решили, что теперь уже пора выставить гипотезу, которая дала бы объяснение загадочных явлений радиоактивности. Гипотеза, которую они придумали и опубликовали (в 1903 году) заключается в следующем.

Атомы радиоактивных веществ взрываются, распадаются на части. Лучи Беккереля, которые испускаются радиоактивными веществами, — это осколки, отлетающие от атома при таком взрыве. Неверно, что все атомы бессмертны, что они живут вечно, не изменяются, не стареют, не разрушаются.

Все это такой же предрассудок, как и то, что атомы не могут быть разделены на части. Предрассудок о неделимости атома был уничтожен благодаря открытию электрона, которое показало, что атом — сложная система, состоящая из более мелких частиц. Таким же образом исследование радиоактивности должно уничтожить предрассудок о бессмертии атомов. Атом радиоактивного вещества живет некоторое время, а затем умирает, взрываясь на части и разбрызгивая во все стороны свои осколки. Но не у всех радиоактивных атомов одинаковая «смертность»: атомы эманации радия вымирают очень быстро, так что через несколько дней от первоначального количества эманации радия остается только небольшая часть, а атомы самого радия или урана вымирают гораздо медленнее, так что даже через несколько лет практически мы не можем еще заметить никакого уменьшения их количества. Но все же и они умирают, и дают об этом знать своими лучами Беккереля. Эманация радия, постепенно возникающая из радия, состоит из атомов эманации радия. Так как в лучах Беккереля, испускаемых радием, никаких тяжелых<sup>1</sup> частиц, кроме альфа-частиц, не обнаружено, то самое естественное предположение, которое можно сделать, заключается в том, что атом радия распадается на этом эманации радия и альфа-частицу, что можно записать так:

$$\text{атом радия} \rightarrow \text{атом эманации} + \text{альфа-частица}$$

При таком распаде летят еще и мелкие брызги в виде электронов и гамма-лучей (что касается гамма-лучей, то они ничем не отличаются от очень жестких, т. е. очень проника-

---

<sup>1</sup> Тяжелыми частицами мы называем частицы, которые обладают весом, сравнимым с весом атомов; легкими частицами — те, масса которых сравнима с массой электрона или еще меньше. Такое разделение очень удобно, потому что между самой легкой из тяжелых частиц (атом водорода) и легкими частицами (электронами) лежит целая пропасть.

ющих лучей Рентгена). Выходит, что после смерти атома радия образовался атом другого вещества — эманации радия — и альфа-частица, которая, вероятно, тоже является атомом какого-то вещества. В радиоактивных явлениях мы имеем дело с превращением одних химических элементов в другие, с рождением и смертью атомов, т. е. как раз со всем тем, что считал невозможным Дальтон и все химики XIX столетия, но к чему стремились средневековые «делатели золота». Правда, средневековые алхимики стремились превращать одни химические элементы в другие по собственному желанию, стремились управлять этим превращением, а радий, как мы видели, остается совершенно равнодушным ко всем попыткам физиков как-то повлиять на интенсивность испускаемых им лучей Беккереля и замедлить или ускорить его распад. Но как знать? может быть когда-нибудь и удастся добыть тот «сильный и тонкий агент», о котором мечтал Роберт Бойль, и научиться управлять с его помощью радиоактивными явлениями, замедляя и ускоряя их по произволу, вызывая распад атомов там, где он не хочет происходить сам собою, и прекращая его там, где он происходит. Но не для того нам пригодится этот «тонкий и сильный агент», чтобы добывать золото — этот хотя и полезный, но все же не очень важный химический элемент. Есть вещи поважнее золота, и их мы найдем в недрах атомов. Радий — это склад энергии. Его запас энергии не безграничен, потому что, с точки зрения гипотезы Резерфорда и Содди, в радии, как и в горящем топливе, что-то тратится, и это что-то есть он сам: атомы радия уничтожаются, превращаясь в другие атомы. Но все-таки этот запас энергии очень велик (когда Резерфорд и Содди впервые выставили свою гипотезу, его нельзя было даже приблизительно учесть). Грамм радия — это резервуар энергии, — резервуар, из которого она вытекает медленно и неохотно. Удастся ли когда-нибудь открыть кран пошире — так, чтобы она вытекала быстрее? А может быть и другие

атомы тоже радиоактивны, но только отдают свои лучи так медленно и так мало, что мы не в состоянии этого заметить? И есть ли какие-нибудь способы заставить эти атомы распадаться на части быстрее, чем они распадаются сами? Какими могущественными стали бы люди, если бы им удалось взнуздать и подчинить себе эти таинственные силы, kloкочущие в недрах атомов! «Люди, которые могли бы это сделать, — писал Содди, — не особенно нуждались бы в том, чтобы в поте лица своего добывать хлеб свой. Они могли бы переделать пустыни, растопить обледенелые полюсы, сделать весь мир веселым райским садом». И какими жалкими показались бы им те запасы энергии — сила воды и ветра, химическая энергия безумно растрчиваемых нами угля и нефти — которыми располагает современное человечество. Подчинив себе радиоактивность, люди совершили бы такой же огромный скачок вперед, какой они совершили когда-то, когда первобытный человек, подчинив себе огонь, сделался повелителем и господином остальных животных.

Такова была гипотеза Резерфорда и Содди. Такова была предложенная ими разгадка радиоактивности. Она открывала перед физикой широчайшие перспективы. Она в корне меняла все физические представления, относящиеся к атомам и к их судьбе. Она была смела, необычна. Но была ли она правильна?

Предстояло проделать огромную работу, проверить во всех деталях эту «гипотезу превращения элементов», как называли ее Резерфорд и Содди, объяснить все темные, неясные пункты. И прежде всего, конечно, нужно было проверить, действительно ли атом радия превращается в атом эманации радия и в альфа-частицу.

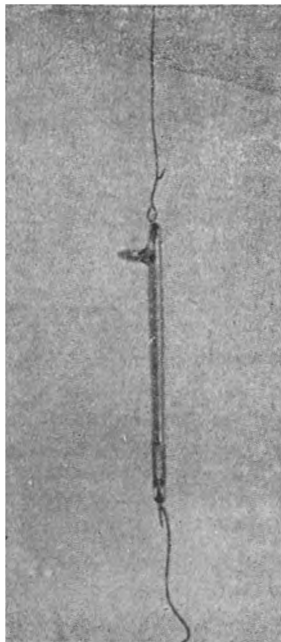
Для этого следовало собрать как можно больше дополнительных сведений. В частности, нужно было, наконец, узнать, что же такое эта альфа-частица? Имеет ли она один элементарный заряд и массу, равную удвоенной массе атома во-

дорода, или же два элементарных заряда и массу, равную учетверенной массе атома водорода, или же три элементарных заряда и массу, равную ушестеренной массе атома водорода и т. д. ? Резерфорд и Содди рассуждали так: альфа-частица должна быть каким-то атомом, обыкновенным атомом какого-то химического элемента, хотя и положительно заряженным, т. е. потерявшим один или два или три и т. д. электрона. Но такого химического элемента, у которого атом весил бы вдвое больше, чем атом водорода, повидимому не существует. Поэтому первую из перечисленных возможностей приходится отбросить. Зато атом, который весит в четыре раза больше атома водорода, существует — это атом газа гелия, открытого незадолго перед этим (в 1896) сэром Вильямом Рэмзеем (см. стр. 61). Поэтому весьма вероятно, что альфа-частица — это и есть атом гелия, заряженный двумя положительными элементарными зарядами, т. е. потерявший два электрона. Конечно, такое рассуждение нельзя считать очень убедительным потому, что легко могло бы оказаться, например, и что альфа-частица есть атом кислорода, потерявший восемь электронов (это тоже дало бы правильное значение для отношения  $\frac{e}{m}$ , потому что знаменатель был бы в 16 раз больше, чем у водородного иона, а числитель — в 8 раз). Но Резерфорд и Содди считали наиболее вероятным, что альфа-частица есть атом гелия, от которого откололо два электрона. Они основывались на одном факте, который был хорошо известен химикам и геологам, хотя никто до Резерфорда и Содди не мог понять его причины, а именно на том, что гелий встречается в тех минералах, в которых присутствуют радиоактивные вещества торий или уран. Так, например, цейлонский минерал торинанит, названный так потому, что он содержит значительное количество тория, содержит в себе также и гелий, который можно извлечь из торинанита, если его хорошенько накалишь на огне.

Химики и геологи хорошо знали, что там, где есть уран или торий, там неизменно оказывается и гелий, но причины этого явления они не понимали. Ясно было только то, что эта причина не могла быть чисто химической: гелий не вступает ни в какие химические соединения с другими веществами, а потому нет никаких разумных оснований думать, что гелий приходит извне в минералы, содержащие уран или торий, и остается там. С точки зрения Резерфорда и Содди причина должна быть как раз обратная: гелий возникает внутри минералов, содержащих уран или торий, и возникает потому, что он является одним из продуктов радиоактивного распада: альфа-частицы, испускаемые радиоактивными элементами, постепенно накапливаются внутри минералов, в которых вкраплены радиоактивные вещества, и тот гелий, который химики находят в этих минералах, как раз и состоит из таких альфа-частиц. Гелий этот состоит из обломков давно распавшихся более тяжелых атомов: он представляет последнее звено в той медленной эволюции вещества, которая происходит в земной коре. Вероятно не только гелий, находимый в минералах, но и тот гелий, который в огромных количествах поднимается из трещин земной коры в некоторых местах Соединенных Штатов и уже в течение нескольких лет (со времени мировой войны) больше не рассеивается в атмосфере, а усиленно используется для наполнения дирижаблей — даже и этот гелий, вероятно, тоже образовался в результате каких-то радиоактивных процессов в глубоких недрах земного шара. Эволюция вещества, связанная с радиоактивностью, должна совершаться очень медленно и постепенно: радий, который всегда находят в урановых рудах, безусловно является одним из потомков урана; далее атомы радия, испуская альфа-частицы, превращаются в атомы эманации; эта последняя испытывает какие-то дальнейшие превращения, так как ведь и она испускает альфа-частицы и т. д. и т. д. Как далеко идет это превращение, когда оно прекра-



щается и какие окончательные продукты, кроме гелия, получаются в результате всего этого последовательного ступенчатого распада, на эти вопросы Резерфорд и Содди тогда (в 1909 году) еще не могли дать категорического ответа.



Спектроскопическая трубка, в которой Содди и Рэмзэй доказали появление гелия из эманации радия.

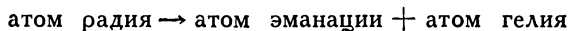
Содди переселился из Монреаля в Англию и стал работать вместе с Рэмзеем. Они взяли некоторое количество воздуха, к которому была примешана эманация радия, и поместили его в спектроскопическую трубочку. Это — длинная стеклянная трубочка; у концов она шире, а в середине она совсем узка. С того и с другого конца в нее впаяны платиновые проволоочки: через эти проволоочки можно пропускать электрический ток по газу, запертому в трубочке. Когда через такую спектроскопическую трубочку пропускают ток, то в узком ее месте газ начинает ярко светиться и с помощью спектроскопа можно рассмотреть его спектр.

Рэмзэй и Содди запаляли трубочку, а затем несколько дней подряд ходили смотреть на

спектр эманации. И вот оказалось, что с каждым днем спектральные линии эманации становятся все слабее и слабее. А вместо них загораются другие линии, которых раньше не было — спектральные линии гелия. С волнением рассматривал Рэмзэй этот хорошо ему известный спектр. Чем слабее становился спектр эманации радия, тем ярче и ярче разгорался

спектр гелия. Гелий родился на глазах у Рэмзэя и Содди.

Впоследствии ( в 1909 году) Резерфорд сделал (вместе с одним из своих помощников — Ройдсом) другой опыт, еще более убедительно доказавший, что альфа-частица — это атом гелия. Резерфорд и Ройдс заперли эманацию радия в стеклянную трубочку с такими тонкими стенками, что испускаемые эманацией альфа-частицы совершенно свободно проходили сквозь эти стенки. Эту тонкостенную трубку они поместили в стеклянный сосуд, который был вверху соединен со спектроскопической трубочкой. Из сосуда был дочиста откачан воздух. После этого они подождали два дня, в течение которых некоторое количество альфа-частиц успело выскочить из тонкостенной трубочки и скопиться в сосуде. Тогда они, наполнив сосуд ртутью, заставили все, что там было, подняться наверх в спектроскопическую трубочку и сжаться там. Через трубочку был пропущен ток, и в поле зрения спектроскопа явственно загорелась желтая спектральная линия гелия. А через шесть дней можно было видеть и другие менее яркие линии гелиевого спектра. Значит альфа-частицы, вышедшие через тонкие стенки трубочки, в которой была заперта эманация, и собранные затем в спектроскопической трубочке, действительно оказались самым обыкновенным гелием. Поэтому гипотетическую формулу распада радия следует писать в следующем виде:



Еще одна последняя окончательная проверка была необходима: нужно было проверить, действительно ли вес атома эманации радия, сложенный с весом атома гелия, даст вес атома радия. Атомный вес радия был известен: его с большой точностью определил химик Хенигшмит и он оказался равен 225,97. Атомный вес гелия равен 4,00. Поэтому, если только гипотеза Резерфорда и Содди правильна, то атомный

вес эманации радия должен быть приблизительно равен 222.

Предстоял решающий эксперимент. Атомный вес эманации радия был совершенно неизвестен. Он мог бы оказаться любым числом, но теория утверждала, что он должен равняться 222. Если опыт подтвердит это предсказание, то взгляды Резерфорда и Содди приобретут необыкновенную убедительность и силу. Если предсказание окажется неверным, то их теорию нужно будет отбросить и искать какую-то совершенно другую.

За производство эксперимента взялся сэр Вильям Рэмзэй. Необыкновенная трудность стоявшей перед ним задачи, неслыханная в истории химии, заключалась в том, что количество эманации, бывшее в его распоряжении, было совершенно ничтожным — не больше булавочной головки. Даже и это крохотное количество эманации должно было считаться очень большим: в громадном большинстве радиоактивных опытов физики имеют в своем распоряжении еще гораздо более ничтожные количества этого газа, который, вероятно, поэтому никогда и не был бы открыт, если бы не лучи Беккереля, которые он испускает и которые позволяют заметить его присутствие. Но Рэмзэй должен был проделать со своей булавочной головкой эманации все, что химики делали с другими газами, атомный вес которых они хотели определить. Прежде всего нужно было определить химические свойства эманации радия. Это была сравнительно легкая часть задачи; даже если бы у Рэмзэя было эманации еще меньше, — так мало, что ее можно было бы обнаружить лишь по действию испускаемых ею лучей Беккереля, — он все равно сумел бы определить ее химическую природу, пробуя соединить ее с различными веществами: то вещество, к которому перешла бы радиоактивность эманации, тем самым обнаружило бы свою способность вступать с эманацией в химическое соединение. Но из опытов Рэмзэя вытекало, что эманация радия ускользает от любого химического поглотителя и что, следовательно,

она не соединяется ни с чем. Иными словами, эманация радия принадлежит к группе «благородных газов», к которой относятся кроме нее гелий, неон, аргон, криптон, ксенон. (Заметим, что с тех пор как этот факт был установлен, эманация радия получила новое название — радон — для того, очевидно, чтобы рифмовать с неоном, аргоном, криптоном и ксеноном. В нашей таблице химических элементов (см. стр. 53) эманация радия тоже фигурирует под этим именем и отныне мы ее будем называть именно так).

Из того, что радон принадлежит к группе благородных газов, отказывающихся соединяться и между собою и с какими угодно другими веществами, следует, что на него можно распространить все те законы, которые оказались справедливыми для остальных благородных газов. В частности можно утверждать (все это было хорошо проверено на остальных благородных газах), что молекула радона состоит только из одного атома радона и что его атомный вес может быть вычислен из его плотности (атомные веса всех благородных газов пропорциональны их плотности). Поэтому перед Рэмзеем встала задача — взвесить крохотное, почти незаметное количество радона, бывшее в его распоряжении, чтобы определить его плотность, а значит и атомный вес. Эту трудную задачу Рэмзэй и его помощник Уайтлоу-Грей разрешили следующим образом. Они построили специальные «микровесы», чувствительность которых превосходила все, что когда-либо было известно в истории измерительного искусства. Крохотное количество эманации радия было введено в пустой и очень легкий кварцевый шарик, который был подвешен к одному концу легчайшего кварцевого же коромысла весов. К другому концу был подвешен кварцевый противовес, который при близительном уравнивании кварцевый шарик с радоном. Для того, чтобы точно уравновесить весы, Рэмзэй и Уайтлоу-Грей пользовались не добавочными разновесками или чем-нибудь в этом роде, а поставили микровесы под стеклянный

колпак и стали менять посредством насоса давление воздуха под этим колпаком. По закону Архимеда, всякое тело, погруженное в газ, теряет в своем весе столько, сколько весит газ, занимающий такой же объем. А так как кварцевый шарик с радоном имел больший объем, чем кварцевый противовес, то он больше терял в весе, чем противовес, и это становилось тем ощутимее, чем плотнее был газ под колпаком. Поэтому Рэмзэй и его помощник могли управлять своими весами, не прибегая к помощи разновесок: хотят они, чтобы противовес опустился, а шарик с радоном поднялся, — для этого нужно только еще подкачать насосом под колпак воздух; а чтобы шарик с радоном опустился, а противовес пошел вверх, следует насосом немножко откачать воздух из-под колпака. С помощью этих остроумных «весов без разновесок» Рэмзэй и Уайтлоу-Грей сумели довольно точно взвесить свой пузырек с радоном, а, значит, и вычислить атомный вес радона. Когда измерения и вычисления были закончены, то в результате получилось, что атомный вес радона почти точно равен 222, т. е. тому самому числу, которое предсказали Резерфорд и Содди.

Резерфорд и Содди торжествовали победу. Теперь уж никто не мог отрицать, что их разгадка радиоактивности правильна и что атом радия, действительно, распадается на атом радона и атом гелия. Начиналась новая эпоха в истории физики и химии. Наряду с обыкновенными химическими реакциями, которые изображаются формулами, где справа и слева стоят те же самые атомы, но только в разных комбинациях, теперь физики и химики должны были рассматривать и такую реакцию:



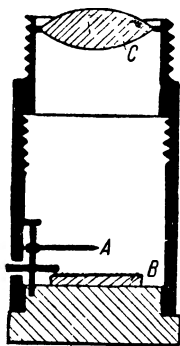
В какой ужас пришел бы старый Берцелиус, если бы ему показали такую химическую формулу!

Из всего того, о чем говорилось на предыдущих страницах, читатель может заключить, что гипотеза Резерфорда и Содди о радиоактивном распаде атома радия на атомы радона и гелия несомненно верна. Не может быть неверной гипотеза, которая подверглась такому суровому испытанию и так блестяще его выдержала. Но Резерфорд счел нужным подвергнуть ее еще и другому испытанию: он захотел определить непосредственно на опыте, чему равен заряд отдельной альфа-частицы. Ведь из догадки Резерфорда и Содди о сущности радиоактивности вытекает, что заряд альфа-частицы должен равняться двойному элементарному заряду: это обязательно должно быть верным, если альфа-частица есть заряженный атом гелия и если отношение  $\frac{e}{m}$  для нее, как показывает опыт, в два раза меньше такого же отношения, вычисленного для водородного иона. Но как это проверить? Как измерить что-либо относящееся к отдельной альфа-частице? Альфа-частица — это атом гелия или, лучше сказать, ион гелия. Не слишком ли самонадеяны физики, вознамерившиеся поймать один единственный атом гелия и измерить его электрический заряд? Не значит ли это — попытаться войти в мир бесконечно малого, в мир невидимого, в мир ускользающего от наших органов чувств?

И все же эта смелая попытка удалась. Физики действительно смогли увидеть невидимое. Первый, кому это удалось, был сэр Вильям Крукс. Для того, чтобы совершить это чудо, он совсем не строил грандиозных и сложных приборов, при виде которых всякий неученый человек начинает чувствовать себя нехорошо — он соорудил совсем крохотный и пустяковый приборчик стоимостью рубля в полтора. И с помощью этого приборчика он смог увидеть отдельные атомы.

Прибор Крукса — так называемый спинтарископ — имеет следующее устройство: он состоит из небольшой трубки, на-

поминающей по виду и по размерам трубку от маленького геатрального бинокля. Один конец трубки закрыт экраном, который покрыт (с внутренней стороны) сернистым цинком. С другого конца в трубку вставлено увеличительное стекло, с помощью которого можно рассматривать этот покрытый сернистым цинком экран. Внутри трубки укреплена иглолка, конец которой расположен на оси трубки между увеличительным стеклом и экраном. На этом конце



#### Спидтарископ Крукса.

Справа — внешний вид прибора. Слева — схематический чертеж (А — иглолка, В — флюоресцирующий слой, С — лупа).

иглолки имеется ничтожное количество радия, причем — и в этом состоит наиболее эффективная особенность прибора Крукса — чем меньше радия, тем лучше. Для того, чтобы насадить на конец иглолки нужное количество радия, поступают так: этим концом иглолки слегка дотрагиваются до внутренней стенки пробирки, в которой когда-то был препарат радия. Вот и все. Неудивительно, что прибор Крукса так дешево стоит, хотя в нем имеется радий — самое дорогое вещество в мире.

Прибор готов. Как же увидеть с помощью этого прибора отдельные атомы? Для этого нужно пойти с ним в темную комнату и подождать некоторое время, пока глаза отдохнут и хорошенько привыкнут к темноте. Потом нужно посмотреть в увеличительное стекло прибора.

Странное зрелище тогда предстанет перед нашими глазами. На поверхности экрана вспыхивают и гаснут маленькие неяркие звездочки. Они загораются то тут, то там, и весь экран так и кишит ими. Его поверхность была бы похожа на звездное небо, видимое в телескоп, если бы вся картина не менялась так быстро, как в калейдоскопе. Разорванные вспышки,

усеивающие экран, гаснут так же внезапно, как появляются, и все, что мы видим, производит впечатление беспрестанной бомбардировки экрана микроскопическими зажигательными снарядами, вызывающими вспышку в той точке экрана, в которую они попадают. И это впечатление совершенно правильно — то, что мы видим, это и есть бомбардировка: ведь на кончике иглы находится крохотный, почти невесомый и совершенно невидимый кусочек радия, из которого все время вырывается поток микроскопических снарядов — альфа-частиц. Если бы радия было больше, то весь экран светился бы равномерно и ярко: отдельные вспышки сливались бы в одно сплошное свечение экрана. Но так как радия очень мало, то вспышки видны раздельно: мы видим кратковременный светящийся след, который оставляет на поверхности экрана отдельная альфа-частица, один атом гелия, перелетевший от кончика иглы к экрану с огромной скоростью в несколько десятков тысяч километров в секунду, чтобы рассказать о смерти одного атома радия. Всяким наблюдателем, впервые смотрящим в спинтарископ и понимающим в чем состоит смысл открывающегося перед ним зрелища, поневоле овладевает странное и жуткое чувство, похожее на то, которое овладевает нами, когда мы смотрим в телескоп на особенно богатые звездами участки Млечного Пути. И в том и в другом случае мы видим перед собой бездну, — в одном случае бездну бесконечно малого, в другом — бездну бесконечно большого, — и, глядя в обе эти бездны, одинаково далекие от нас и одинаково безразличные к нам, мы начинаем понимать смысл странных слов Паскаля о том, что «человек подвешен между двумя бесконечностями».

Гениальное изобретение Крукса, сделанное им в том же самом 1903 году, в котором Резерфорд и Содди впервые выставили свою гипотезу о превращении химических элементов, знаменует, как и эта гипотеза, начало совершенно новой эпохи в физике. Не странно ли, что атомы стали видимой,



ощутимой реальностью как раз в то же самое время, когда было уничтожено представление о неразрушимости и непревращаемости атомов? Физики так долго и так тщательно стремились доказать, что атомы действительно существуют, и вот наконец эта цель достигнута: спинтарископ Крукса позволяет видеть действия отдельных атомов — заряженных атомов гелия. Но в то же самое время, когда таким образом реальность атомов доказана совершенно неоспоримо, становится ясным, что атомы совсем не те вечные, бессмертные, неразрушимые частицы, какими их представлял себе Джон Дальтон: атомы рождаются, живут и умирают, с атомами происходят чудесные превращения, ослепительные взрывы, они разлетаются на части, и возникающие при этом осколки — это новые атомы. Похоже на то, что средневековые алхимики, стремившиеся превращать одни химические элементы в другие и так осмеянные за это впоследствии, в конце концов оказались правы. Но не будем преувеличивать их правоту. Вспомним, как все ухищрения лабораторной техники оказались бессильными повлиять на быстроту распада радия. вспомним, какими равнодушными и неприступными и забронированными от всех внешних воздействий оказались атомы этого чудесного вещества. Все это показывает, что радиоактивность принадлежит совершенно особому миру явлений, с которым физики никогда не встречались раньше — иными словами, что в радиоактивных явлениях действуют совершенно огромные, чудовищные силы, несравнимые со всем, что было известно физике прежде, и значит такие же огромные чудовищные силы требуются для того, чтобы управлять радиоактивными явлениями и изменить их естественное течение. Значит Джон Дальтон был в каком-то смысле прав, хотя правота его и не была абсолютной, а относилась только к некоторому ограниченному кругу явлений: в пределах этого круга явлений атомы действительно неразрушимы и бессмертны, и требуется далеко перейти за пределы этого круга и привести

в действие силы совершенно иного порядка («тонкий и сильный агент» Роберта Бойля) для того, чтобы вызвать превращение одних химических элементов в другие. В обыкновенных явлениях, которые изучаются в химической лаборатории, атомы действительно никогда не превращаются друг в друга и ошибка средневековых алхимиков и заключалась в том, что они пытались вызвать это превращение, не располагая «тонким и сильным агентом», а пользуясь лишь обыкновенными силами, которые развиваются при химических реакциях. В тех случаях, когда они утверждали, что им действительно удалось получить золото из других металлов, все это объяснялось или сознательным надувательством или экспериментальной ошибкой (например, золото извлекалось из какого-либо химического соединения, содержащего золото, путем замещения золота другим металлом, а неискушенному экспериментатору казалось, что он превращает этот металл в золото).

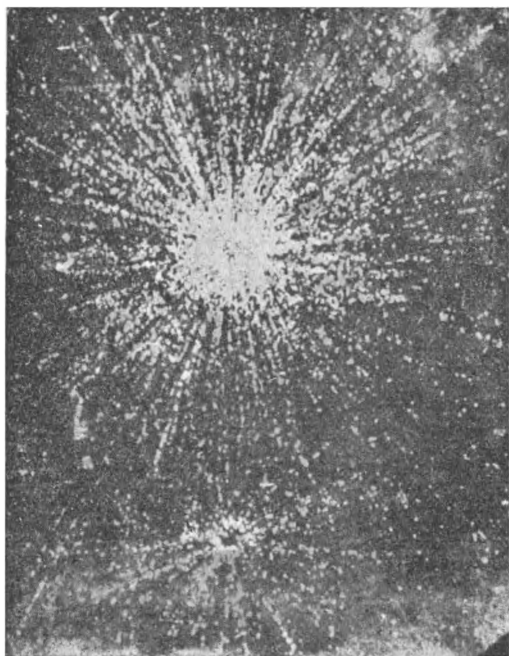
Как только изобретенный Круксом спинтарископ сделался известен остальным физикам, возникла задача счета альфа-частиц. В спинтарископе Крукса такой счет невозможен, потому что иголка находится слишком близко от экрана (несколько миллиметров) и в каждый момент на экран сыплется целый дождь альфа-частиц, так что сосчитать их нет никакой возможности. Но если поставить препарат с известным количеством радия достаточно далеко от экрана (но так, чтобы между препаратом и экраном был не воздух, поглощающий альфа-частицы, а безвоздушное пространство), то можно будет сосчитать количество вспышек, загорающих на каждом квадратном сантиметре поверхности экрана в среднем в течение секунды. Отсюда уже будет легко сосчитать, сколько альфа-частиц испускает препарат по всем направлениям, т. е. узнать, в конце концов, сколько альфа-частиц испускает каждый грамм радия в секунду. Знать это число важно по двум причинам: во-первых, если мы затем каким-нибудь способом измерим заряд, уносимый всеми

альфа-частицами, которые вылетают в секунду из грамма радия, то мы можем, разделив его на число этих частиц, узнать заряд отдельной альфа-частицы; во-вторых, зная число альфа-частиц, испускаемых в секунду граммом радия или урана, мы тем самым знаем, сколько атомов радия или урана распадается в секунду из общего числа этих атомов в одном грамме, — иными словами, мы сумеем вычислить быстроту распада радия и урана.

В 1908 году немецкий физик Э. Регенер действительно осуществил такой подсчет числа вспышек. Но этот метод счета альфа-частиц не очень надежен, так как он сильно зависит от состояния глаз наблюдателя: глаза очень быстро утомляются, и поэтому подсчет альфа-частиц по наблюдению вспышек на экране из сернистого цинка требует миллиона предосторожностей. Поэтому физики стремились заменить метод вспышек каким-нибудь другим, более объективным (не так сильно зависящим от наблюдателя) и потому более надежным методом. Таких методов было придумано целых три — один замечательнее другого. Эти три объективных метода обнаружения отдельных альфа-частиц мы по порядку опишем; и только после этого перейдем к тем результатам, которые были с помощью этих методов получены.

Наиболее простым по идее способом является фотографический. Ведь альфа-частица вызывает заметное действие не только тогда, когда она падает на флюоресцирующий экран, но и тогда, когда она падает на фотографическую пластинку. В 1910 году японец Киносита внимательно изучил действие отдельных альфа-частиц на фотографическую пластинку и нашел, что каждая альфа-частица вызывает заметное почернение того зернышка светочувствительного слоя, на которое она упала. После того, как пластинка проявлена, можно сосчитать под микроскопом количество почерневших зернышек, и это даст число альфа-частиц, упавших на пластинку. Можно поступить и так: дотронуться до какого-нибудь места свето-

же некоторое ничтожное и совершенно невидимое количество чувствительного слоя острием палочки, которым мы предварительно дотронулись до радиоактивного препарата. Сейчас



Пути альфа-частиц на фотографической пластинке, расходящиеся из точки, «зараженной» радием С.

радиоактивных атомов перейдет на фотографическую пластинку. Эти атомы станут испускать во все стороны альфа-частицы. Некоторые из альфа-частиц полетят в самой плоскости пластинки, пронизывая одно зерно светочувствительного слоя за другим. Если через некоторое время проявить пластинку, то на ней будут явственно видны следы промчав-

шихся альфа-частиц в виде лучей, расходящихся во все стороны от того места, до которого мы дотронулись иголкой.

Фотографический метод не очень удобен на практике и поэтому не получил большого распространения. Гораздо удобнее оказался другой метод — электрический, который был изобретен в 1908 году Резерфордом и его помощником Гайгером.

Идея этого способа заключается в следующем: мы знаем, что каждая альфа-частица, влетевшая в какой-нибудь сосуд с газом, производит в этом газе ионизацию, отрывая электроны от молекул газа, с которыми она сталкивается, и превращая эти молекулы в ионы. При таком столкновении, как нетрудно сообразить, возникает сразу пара заряженных частиц — одна частица заряжена положительно, а другая отрицательно, — пара ионов, как принято говорить. Число ионов, образуемых каждой альфа-частицей, очень велико. В настоящее время мы знаем, например, что альфа-частица, летящая со скоростью 19 220 км/сек,<sup>1</sup> производит в воздухе двести тысяч пар ионов на каждом сантиметре своего пути. Но, как ни велико число этих ионов, оно все-таки слишком мало для того, чтобы можно было его непосредственно обнаружить: необходимы необыкновенно чувствительные приборы, измеряющие ток, для того, чтобы удалось измерить электрический ток, состоящий из нескольких сот тысяч движущихся элементарных электрических зарядов. Да в 1908 году таких чувствительных измерительных приборов вовсе и не было: лишь в 1928 году немецкому физiku Гофману удалось построить такой прибор, и то он настолько капризен и чувствителен к малейшим влияниям (дохнешь на него — и он уже расстроился), что работать с ним весьма затруднительно. Резерфорд и Гайгер и не стали стремиться к тому, чтобы непосредственно обнаружить ионы, производимые отдельной альфа-

---

<sup>1</sup> С такой скоростью летят альфа-частицы, испускаемые так называемым радием С', одним из продуктов распада радона (см. ниже).

частицей. Они сообразили, что можно усилить ионизирующее действие альфа-частицы, если в том сосуде с газом, через который она пролетает, будет сильное электрическое поле: в этом электрическом поле каждый ион, образовавшийся от действия альфа-частицы, получит большую скорость и, сталкиваясь с другими молекулами газа, сам в свою очередь произведет множество новых ионов; эти последние тоже разгонятся в сильном поле и каждый из них снова образует много других ионов и т. д. и т. д. Ионизация будет расти как лавина, и поэтому ее легко будет обнаружить даже и не слишком чувствительными приборами.

«Счетчик альфа-частиц», сконструированный Резерфордом и Гайгером в 1908 году, был устроен так: по оси длинного латунного цилиндра (25 см длины, 1,77 см в диаметре) проходит проволока. Эта проволока изолирована от цилиндра, потому что она входит в цилиндр и выходит из него через специальные эбонитовые изоляторы. Из цилиндра слегка откачивается воздух (опыт показал, что ионизационная лавина лучше всего образуется в воздухе, когда давление равно нескольким сантиметрам ртутного столба). Посредством батарей аккумуляторов, один полюс которой заземлен, а другой соединяется со стенками латунного цилиндра, осуществляется сильное электрическое поле между стенками цилиндра и проволокой. Проволока соединена с чувствительным прибором, измеряющим ток. В одном из эбонитовых изоляторов сделано маленькое отверстие для впуска альфа-частиц, прикрытое тончайшим слюдяным листком. Как только альфа-частица влетает внутрь цилиндра и ионизует в нем воздух, каждый из образовавшихся ионов сейчас же разгоняется сильным электрическим полем, существующим между проволокой и стенками цилиндра, и начинает производить новые ионы. Лавина растет и развивается, как было описано выше. В результате этого от стенок цилиндра к проволоке идет заметный

электрический ток и попадает в чувствительный электрометр, с которым соединена проволока. Нить электрометра вздрагивает каждый раз, когда в него попадает ток, и все ее движения записываются на кинематографической пленке, движущейся перед электрометром. Такой прибор позволил Резерфорду и Гайгеру отмечать прохождение отдельных альфа-частиц через прибор даже и тогда, когда число альфа-частиц достигало тысячи в минуту.

Впоследствии Гайгер, уже независимо от Резерфорда, работал и усовершенствовал этот счетчик. «Счетчик Гайгера-Мюллера», представляющий дальнейшее усовершенствование спisanного здесь счетчика Резерфорда и Гайгера, является одним из наиболее замечательных и чувствительных приборов современной физики. Но мы не будем описывать его устройство подробно, потому что его основная идея такая же самая, как у счетчика Резерфорда и Гайгера. Заметим только, что счетчик Гайгера-Мюллера очень чувствителен не только к влетающим в него альфа-частицам, но и к быстрым электронам и к другим частицам.

Рассмотрим теперь и третий, наиболее замечательный способ «видеть атомы» — способ конденсации водяных паров, придуманный английским физиком Ч. Т. Р. Вильсоном. Этот способ замечателен тем, что он позволяет не только обнаруживать отдельные быстро движущиеся заряженные атомы и электроны, но и видеть и изучать те пути, по которым эти частицы движутся. Основная идея состоит в следующем.

Если в воздухе находятся пары воды или какой-нибудь другой жидкости (например пары спирта), то они сейчас же превратятся в жидкость, если только достаточно сильно их охладить. Очень простой способ охлаждения заключается в том, чтобы очень быстро увеличить объем сосуда, в котором находятся эти пары. Можно сделать, например, так: устроить камеру в виде трубы, по которой ходит поршень. Если быстро выдвинуть этот поршень, то воздух с водяным паром, нахо-

дящийся в камере, сразу расширится и его температура сейчас же упадет. При этом водяной пар превратится в мельчайшие водяные капельки, рассеянные по камере в виде тумана.

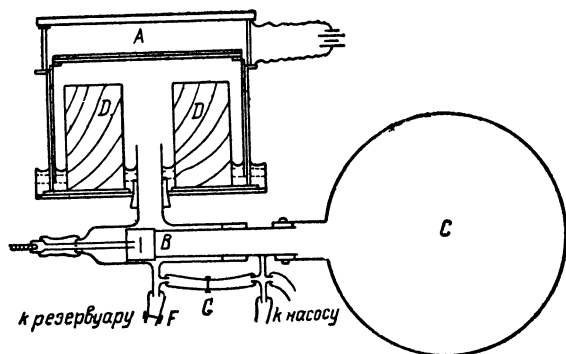
Изучая образование этого тумана, Вильсон обнаружил очень замечательный факт. Он нашел, что туман образуется не всегда. Если пространство в камере совершенно чисто и не содержит даже микроскопических пылинок, то, несмотря на сильное охлаждение камеры при выдвигании поршня, туман не образуется. Водяной пар остается паром, остается, как физики говорят, в переохлажденном состоянии. Но если в камере есть микроскопическая пыль, то пар превращается в жидкость, и при том тем охотнее, чем этой пыли больше. Изучив это явление ближе, Вильсон пришел к заключению, что каждая микроскопическая пылинка является тем центром, вокруг которого происходит конденсация (сгущение, превращение в жидкость) водяного пара. Вокруг каждой микроскопической пылинки образуется капелька воды. Но не только пылинки, плавающие в воздухе, могут служить такими центрами конденсации. Если в воздухе некоторое количество молекул ионизировано, т. е. если в нем есть некоторое число электронов и заряженных электричеством молекул (ионов), то конденсация пара происходит совершенно так же, как если бы там была микроскопическая пыль. Выходит, что не только крохотные твердые пылинки могут служить центрами конденсации, но и ионы (электроны и заряженные молекулы). Водяной пар может оседать на эти ионы, обволакивая их капельками воды. Если в каком-нибудь пространстве содержится переохлажденный водяной пар, который хотел бы сгуститься в жидкость, но не может вследствие отсутствия подходящих центров конденсации, то стоит только образовать в этом пространстве достаточно большое количество ионов (например рентгеновскими лучами), как пар сейчас же оседает на этих ионах и возникает туман. Повидимому, образование тумана и дождевых капель в нашей атмосфере тоже



связано с наличием в воздухе пыли и ионов. В последнее время были проделаны многочисленные опыты, цель которых была — ускорить образование дождевых капель посредством разбрасывания с аэроплана заряженного песка или заряженной пыли. Хотя эти опыты и не дали ценных для сельского хозяйства результатов (такой «искусственный дождь» над большой территорией потребовал бы слишком больших затрат), тем не менее действительно оказалось, что вокруг заряженных пылинок образуются дождевые капли. Этот механизм возникновения капелек дождя и мельчайших капелек тумана, исследованный Вильсоном еще в 1893 году, помог ему в 1911 году построить прибор, позволяющий «видеть атомы».

Идея Вильсона очень проста: альфа-частица (или другая заряженная быстро движущаяся частица) влетает в камеру, в которой находится воздух с водяным паром. На пути этой частицы образуется большое количество ионов. Если очень быстро увеличить объем камеры (например посредством выдвигания поршня), то водяной пар охладится и сразу же осядет на ионах, которые густо усеивают путь прошедшей заряженной частицы. Вокруг каждого иона образуется крошечная капелька, но так как ионов очень много, то капельки сольются в целое ожерелье капелек, в длинную струйку воды. Эту струйку можно будет просто увидеть глазом, и можно будет, если мы только захотим, сфотографировать. Мы увидим «туманный след», который точно воспроизводит тот путь, по которому только что прошла заряженная частица. Мы увидим путь отдельной альфа-частицы или путь отдельного электрона! В спинтарископе Крукса мы видим гораздо меньше: там каждая альфа-частица отмечала вспышкой на экране только одну точку своего пути — точку пересечения пути с экраном, — а здесь мы увидим весь ее путь в целом. Мы сможем увидеть своими глазами как пути быстрых альфа-частиц искривляются в сильном магнитном поле, мы сможем увидеть как альфа-частица меняет направление своего движе-

ния, столкнувшись с каким-нибудь атомом, мы сможем увидеть все то, о чем атомная физика раньше говорила, не имея никакой возможности непосредственно проверить правильность своих слов. Поистине, камеру Вильсона можно назвать самым чудесным из всех физических приборов, изобретенных в XX столетии.

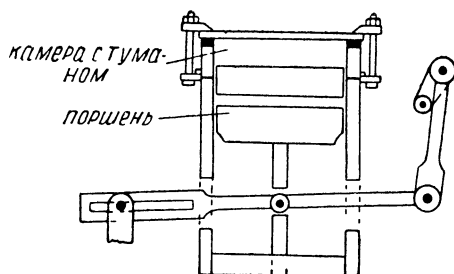


Камера Вильсона.

Заемствуем из книги Резерфорда, Чэдвика и Эллиса «Лучи радиоактивных веществ», вышедшей в Кэмбридже в 1930 году, подробное описание камеры Вильсона:

«Конструкция камеры, с которой работал Вильсон, видна на приложенном рисунке. Закрытая толстым стеклом цилиндрическая камера А, диаметром в 16,5 см и высотой в 3,4 см, представляет собой пространство, в котором получают пути частиц. Расширение достигается поворотом вентиля В, который соединяет пространство под «полом» камеры с сосудом С, из которого предварительно воздух удален насосами (через стеклянную трубку, указанную на рисунке). При открывании вентиля «пол» камеры внезапно опускается до упора на резиновую подкладку. Деревянные цилиндры Д служат только для того, чтобы объем воздуха, перемещающегося при расширении, был меньше. Вентиль В управляется с помощью

маятника, который одновременно вызывает разряд мощной конденсаторной батареи через трубку с ртутным паром, где получается яркая вспышка, освещающая пространство внутри камеры настолько интенсивно, что получившиеся пути запечатлеваются на пластинке фотоаппарата,<sup>1</sup> наведенного на внутренность камеры через стекло, которым она покрыта сверху. Камера все время наполнена насыщенным паром воды, так как ее крышка и дно покрыты тонким слоем влаж-



Камера Вильсона-Шимизу.

ного желатина. Между «потолком» и «полом» камеры при надобности может быть включено электрическое поле (с помощью батарей), служащее для того, чтобы убрать ионы, образовавшиеся в камере, и очистить ее

для следующего опыта. При точной регулировке промежутка времени между расширением и вспышкой (фотографированием) эта камера позволяет получить очень резкие и ясные стереоскопические фотографии.

При изучении некоторых явлений необходимо иметь фотографии путей огромного множества альфа-частиц, иногда — до одного миллиона. В этом случае необходим прибор автоматического типа, который позволял бы производить много расширений камеры через очень короткие промежутки времени. Для этой цели Шимизу разработал простую конструкцию камеры, позволяющую последовательно производить большое количество снимков. Устройство камеры Шимизу изображено на рисунке. Точно пригнанный к цилиндру пор-

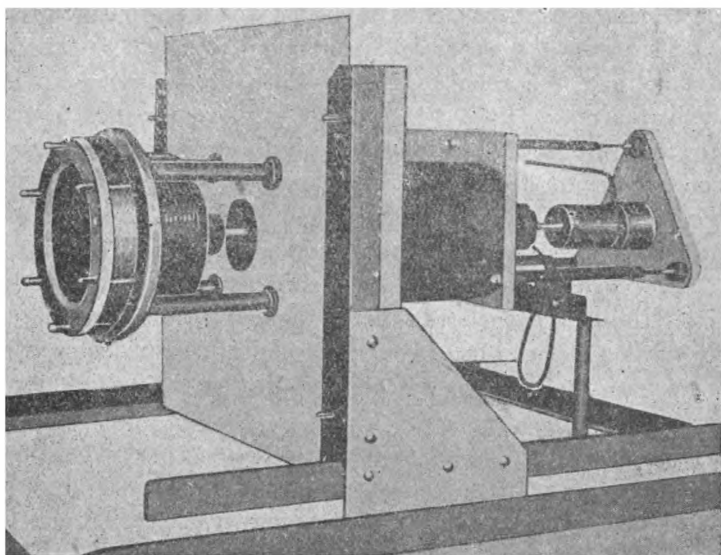
<sup>1</sup> Или двух фотоаппаратов, если нужно получить стереоскопические снимки.

шень качается в камере взад и вперед под действием мотора. Хотя расширение камеры этой конструкции происходит не так внезапно, как в камере конструкции Вильсона, все же в ней получаются прекрасные фотографии, если только позаботиться о том, чтобы альфа-частицы впускались в камеру лишь непосредственно перед тем, как поршень займет свое крайнее положение (максимальный объем камеры). Если применять электрическое поле для очистки камеры от ионов, то она в состоянии работать, расширяясь каждые несколько секунд. Шимизу разработал метод одновременной съемки на движущейся пленке по двум взаимно-перпендикулярным направлениям, что позволяет определить расположение путей частиц в пространстве».

Несколько фотографий, заснятых с помощью камеры Вильсона, приложено здесь рядом. На основании этих фотографий обыкновенно говорят, что Вильсону удалось заснять летящие альфа-частицы. Это выражение не вполне точно, так как фотографировались собственно не сами альфа-частицы и даже не образованные ими ионы, а водяные капельки, осевшие на этих ионах при внезапном увеличении объема переохлажденных водяных паров. Но по этим водяным капелькам, густо расположенным на приблизительно прямой линии, можно заключить, что здесь только что пронеслась альфа-частица, подобно тому, как вид потоптанных полей и дымящихся развалин свидетельствует о том, что через страну прошли полчища великого завоевателя.

Итак, мы познакомились с четырьмя способами «видеть невидимое», с четырьмя способами наблюдать действия отдельных альфа-частиц. Способ вспышек, способ фотографический, способ ионизационной камеры Резерфорда и Гейгера, способ Вильсона.

Рассмотрим же те экспериментальные результаты подсчета альфа-частиц, которые были получены посредством применения этих способов.



Камера Вильсона (одна из конструкций).

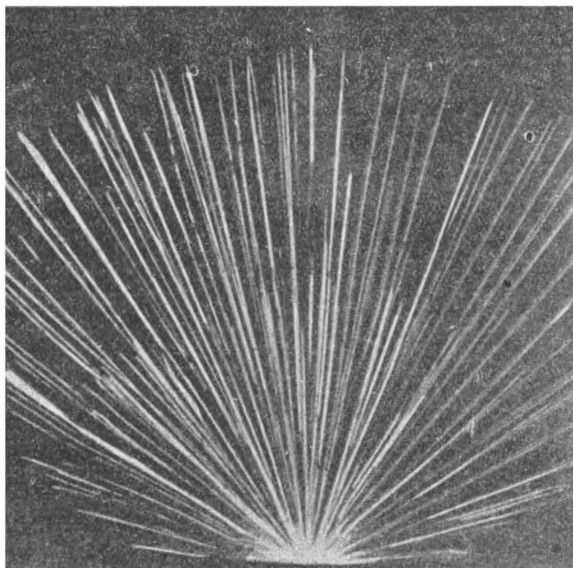


Пути альфа-частиц (толстые линии) и бета-частиц (тонкие линии) в камере Вильсона, наполненной водородом.

В 1908 году Резерфорд и Гайгер, применяя свой электрический счетчик, сумели сосчитать число альфа-частиц, испус-



Путь альфа-частицы в камере Вильсона, наполненной воздухом (источником альфа-лучей является эманация радия, подмешанная к воздуху; поэтому на фотографии виден полный путь — от атома эманации до конца пути).



Пути альфа-частиц, испускаемых торием С и торием С', в камере Вильсона.

На снимке видны две группы альфа-частиц с разными пробегами. Частицы с более длинным пробегом (более быстрые частицы) принадлежат торию С', частицы с менее длинным пробегом (более медленные альфа-частицы) — торию С.

каемых каждым граммом радия в секунду. Эта задача не так легка, как можно было бы подумать, потому что в препарате радия всегда кроме радия присутствуют еще атомы других химических элементов, образовавшихся в результате распада атомов радия (мы знаем, что атом радия, испуская альфа-частицу, превращается в атом радона, но ведь атом радона в свою очередь испускает альфа-частицу, значит распад продолжается и дальше, и в результате получаются другие атомы, которые тоже, быть может, испускают альфа-частицы и т. д.). Поэтому среди альфа-частиц, испускаемых препаратом радия, не все испускает сам радий, а некоторые (как правило, даже большая часть) испускаются продуктами распада радия. Поэтому Резерфорд и Гайгер должны были разобратся в этой путанице и суметь отделить альфа-частицы, испускаемые самим радием от альфа-частиц, испускаемых его продуктами распада. Здесь мы не будем вдаваться в описание того, как им удалось это сделать — достаточно сказать, что им это удалось. Полное количество альфа-частиц, испускаемых одним граммом чистого радия в секунду, оказалось равно  $3,7 \cdot 10^{10}$ .

Тридцать семь миллиардов атомов радия из всего количества атомов, составляющих один грамм радия, умирают в течение каждой секунды. Таков был важный результат, полученный Резерфордом и Гайгером.

Не медля ни одного дня, Резерфорд и Гайгер приступили к следующей части своей задачи — к определению заряда альфа-частицы. Они взяли стеклянный сосуд, из которого хорошенько выкачали воздух. Препарат радия, испускавший определенное и уже известное количество альфа-частиц, был помещен на стеклянное блюдечко, находившееся внутри этого сосуда. Напротив блюдечка была расположена металлическая пластинка, соединенная с очень чувствительным электрометром, с помощью которого было возможно измерять падающий на пластинку электрический ток. Нужно было не забыть

вать еще об одной необходимой предосторожности: препарат радия испускает кроме альфа-лучей еще и бета-лучи, которые в этом опыте совершенно не нужны. Поэтому весь сосуд был поставлен между полюсами электромагнита, магнитное поле которого сдувало прочь бета-лучи, испускавшиеся препаратом, так что ни один электрон бета-лучей не мог долететь до металлической пластинки, соединенной с электрометром. Альфа-лучи не так сильно искривляются в магнитном поле. Поэтому они долетали до пластинки, и полный заряд всех альфа-частиц мог быть измерен.

Эти опыты Резерфорда и Гейгера показали, что полный заряд альфа-частиц, испускаемых в секунду одним граммом чистого радия, составляет 33,2 абс. ед. Так как число этих альфа-частиц равно 37 миллиардам, то заряд альфа-частиц получится, если разделить 33,2 на 37 миллиардов. Отсюда следует, что заряд каждой альфа-частицы равен  $9 \cdot 10^{-10}$  абс. ед. Это число, действительно, приблизительно в два раза больше, чем элементарный электрический заряд. (Конечно, то, что он не точно, а лишь приблизительно в два раза больше, чем элементарный электрический заряд, объясняется только тем, что в таком трудном измерении всегда неизбежны некоторые ошибки, а совсем не тем, что заряд альфа-частицы действительно чем-то отличается от удвоенного заряда водородного иона). Таким образом можно было считать непосредственно доказанным, что каждая альфа-частица несет на себе

двойной элементарный заряд и, следовательно, так как ее  $\frac{e}{m}$  было уже хорошо известно, что альфа-частица в четыре раза тяжелее водородного атома. Это и утверждали Резерфорд и Содди еще в 1903 году, когда они впервые высказали свою гипотезу о превращении элементов. Гипотеза Резерфорда и Содди выдержала еще одно испытание.

В 1909 году Э. Регенер повторил опыты Резерфорда и Гейгера, измеряя таким же способом заряд, переносимый



альфа-частицами. Различие заключалось лишь в том, что он в то же время и подсчитывал число альфа-частиц, но не посредством счетчика Резерфорда-Гайгера, а посредством вспышек. Экраном, на котором возникали вспышки при падении альфа-частиц, служил небольшой алмаз. В результате этой работы у Регенера получилось еще более точное, чем у Резерфорда и Гайгера, значение заряда альфа-частицы, а именно

$$9,58 \cdot 10^{-10} \text{ абс. ед.}$$

Если разделить это число на 2, то получится

$$4,79 \cdot 10^{-10} \text{ абс. ед.}$$

Это число очень близко к тому, которое получил Милликен, когда он измерял (см. предыдущую главу) элементарный электрический заряд.

Рассмотрим еще одно важное следствие, вытекающее из опытов Резерфорда и Гайгера. Мы знаем, что каждый водородный атом весит  $1,662 \cdot 10^{-24}$  гр, а так как атомный вес радия равен 226, то значит каждый атом радия весит  $3,76 \cdot 10^{-22}$  гр. В грамме радия, следовательно, имеется  $2,66 \cdot 10^{21}$  атомов.

Из этих атомов каждую секунду распадается  $3,7 \cdot 10^{10}$  атомов, т. е. доля, равная дроби

$$\frac{3,7 \cdot 10^{10}}{2,66 \cdot 10^{21}} = 1,4 \cdot 10^{-11}$$

Это значит, что любое наличное количество атомов радия уменьшается в течение каждой секунды примерно на полторы миллиардные доли процента. Всякий, кто умеет вычислять с помощью таблицы логарифмов, очень легко сосчитает, сколько же нужно секунд, чтобы наличное количество атомов

радия сократилось, например, вдвое. Необходимое для этого число секунд равно <sup>1</sup>

$$\frac{2,66 \cdot 10^{31}}{3,7 \cdot 10^{10}} \cdot \ln 2 = 5 \cdot 10^{10} \text{ сек}$$

А так как год составляет  $3,16 \cdot 10^7$  сек, то чтобы узнать через сколько лет данное количество атомов радия уменьшится ровно вдвое, нужно разделить  $5 \cdot 10^{10}$  на  $3,16 \cdot 10^7$ . Ответ гласит: через 1600 лет.

Этот необыкновенно важный результат, полученный таким простым способом, сразу объясняет, почему физики, открывшие радий, сочли его неиссякаемым источником энергии, каким-то «вечным двигателем», никогда не устающим отдавать все новые и новые запасы энергии. В действительности радий устает, энергия его иссякает, но только все это происходит очень медленно. Радон (эманация радия) распадается наполовину в течение четырех дней (точнее говоря 3,85 дней), и поэтому уменьшение его радиоактивности было сразу замечено. Но радий распадается на половину в течение 1600 лет, значит в течение самой долгой человеческой жизни данный препарат радия останется почти совершенно таким же самым, каким был. Но все же радий не вечен. Если бы вавилонский царь Хаммураби, царствовавший семь тысяч лет тому назад, положил в свою сокровищницу один грамм радия, то в наше время, даже если бы сокровищница не была разграблена, в ней осталось бы радия не больше, чем несколько десятков миллиграмм.

Не бесконечен, хотя и очень велик, тот запас энергии, который радий растрчивает, превращаясь в радон. Измерения показали, что один грамм радия испускает в час 140 кало-

---

<sup>1</sup>  $\ln$  значит натуральный логарифм. Он равен десятичному логарифму, деленному на 0,4343. (Тот, кто не умеет вычислять с логарифмами, может при чтении пропустить все промежуточные выкладки и просто принять результат на веру).

рий тепла. Это количество тепла испускается, однако же, не одним лишь чистым радием, но также и теми радиоактивными продуктами распада радия, которые всегда присутствуют в радиевом препарате и тоже испускают лучи Беккереля, нагревая все окружающие предметы. Немецкий физик Гесс (в 1912 году) попробовал измерить теплоту, испускаемую препаратом чистого радия, из которого были удалены все продукты распада. Оказалось, что чистый радий дает всего лишь 25 калорий в час, т. е.  $6,9 \cdot 10^{-3}$  калорий в секунду. А мы знаем, что за секунду распадается часть радия, равная  $1,4 \cdot 10^{-11}$ . Значит, когда распадается весь грамм радия, то выделенная им энергия (при превращении в радон) будет равна

$$\frac{6,9 \cdot 10^{-3}}{1,4 \cdot 10^{-11}} = 4,9 \cdot 10^8 \text{ калорий.}$$

Четыреста девяносто миллионов калорий — вот сколько энергии отдает грамм радия, превращаясь в радон! И это еще не вся заключенная в нем энергия: ведь и радон распадается дальше, отдавая энергию еще и еще (в дальнейшем мы увидим, сколько энергии выделяется во всей длинной цепи радиоактивных превращений, в которой превращение радия в радон является лишь одним из звеньев). Для того, чтобы понять как громадна эта энергия, заметим, что при горении грамма водорода (а это одна из самых энергичных химических реакций) выделяется 34 000 калорий тепла, т. е. приблизительно в 10 тысяч раз меньше, чем при превращении грамма радия в грамм радона. Еще эффектнее получится сравнение, если энергию пересчитать на атомы. Энергия, выделяющаяся при превращении одного атома радия



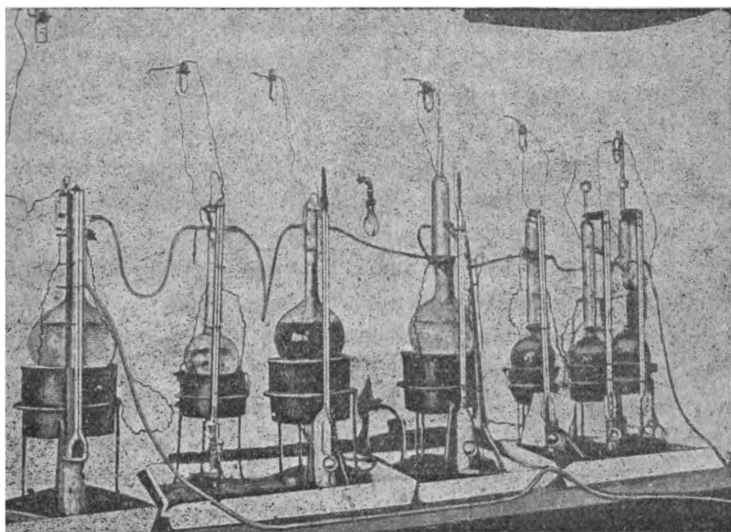
оказывается (как показывает простенький расчет) в полтора миллиона раз больше, чем энергия, освобождающаяся при образовании одной молекулы воды из водорода и кислорода.

Все это показывает, что радиоактивные явления — это действительно нечто совершенно несравнимое по масштабу с обычными явлениями химии.

Еще более интересные цифры получаются для продолжительности жизни урана. Количество альфа-частиц, испускаемых ураном, было сосчитано по такому же способу, как и количество частиц, испускаемых радием. Отсюда можно было вычислить и продолжительность урана. Оказалось, что заданное количество урана должно распасться наполовину в течение четырех с половиной миллиардов лет. Это — огромная цифра даже по сравнению с продолжительностью жизни радия. Четыре с половиной миллиарда лет! Трудно даже представить себе такой огромный промежуток времени. Отсюда следует, что радиоактивность куска урановой руды не могла бы заметно уменьшиться не только за краткий срок человеческой жизни, но даже и за промежуток времени, сравнимый со всей историей человечества. Радиоактивность урана почти бессмертна. В этом смысле, как совершенно справедливо замечает Содди, уран, в сущности говоря, гораздо чудеснее и замечательнее, чем радий: из всех известных нам вещей на земле кусок урановой руды больше всего напоминает «вечный двигатель» — заветную мечту изобретателей. Беда в том, что этот «вечный» или лучше сказать, «почти вечный» двигатель имеет такую маленькую мощность.

Тот факт, что уран не является «вечным двигателем» на самом деле и что с ним, как и с радием, происходит изменение, хотя гораздо более медленное, может быть доказан посредством прямого опыта: из урана постепенно, хотя и весьма медленно, выделяется гелий. Это обнаружил на опыте Содди. Мы приводим из его книжки «Радий и строение атома» рисунок, изображающий прибор, который он употреблял, и описание этого прибора. Это описание может служить хорошей иллюстрацией к словам того же Содди о том, что современ-

ная физика уже не может утверждать, что «ее величайшие открытия делаются при помощи очень простых приборов, сооруженных из проволоки и сургуча», как с гордостью утверждала старинная наука. Радиоактивные измерения требуют сложных приборов и тончайшей экспериментальной техники.



Прибор Содди для доказательства возникновения гелия из урана.

Но дадим слово самому Содди: «Рисунок представляет фотографический снимок прибора, употреблявшегося в моей лаборатории. Это семь совершенно одинаковых аппаратов, стоящих рядом, но независимых и не сообщающихся друг с другом. Каждый аппарат состоит из большой колбы, вмещающей значительное количество исследуемого материала в виде раствора. Колбы снабжены кранами с ртутным затвором особой формы, который, совершенно изолируя на определенный срок содержимое колб от окружающей атмосферы, в то же время может быть открыт в любой момент посредством

отсасывания книзу столба ртути в барометрических трубках, так что накопившиеся в колбе газы могут быть без всякого впуска воздуха извлечены для испытания на гелий. Присутствие воздуха крайне вредно. Пузырек воздуха, величиной с булавочную головку, остававшийся во всем объеме большой колбы или в растворе, или же проникавший в колбу в период накопления газа, обыкновенно совершенно губил опыт. Большинство приспособлений имеет целью предварительное тщательное удаление воздуха из приборов до начала опытов. Методы испытания на гелий также совершенно новы. Они основаны на открытом мной свойстве металла кальция поглощать, при нагревании в безвоздушном пространстве до очень высокой температуры, все следы газов, за исключением газов типа гелия и аргона. Таким образом, ничтожное количество полученного гелия (обычно не более одной тысячной доли кубического миллиметра) является совершенно свободным от следов водяного пара и других газов. Наконец, его переводят при помощи ртути в самую маленькую спектроскопическую трубочку, какая только может существовать, и рассматривают его спектр. Как показали многочисленные специальные опыты, желтая спектральная линия гелия может быть замечена при наличии одной миллионной части кубического сантиметра гелия (или, что то же самое, одной пятимиллиардной доли грамма). Это, конечно, наименьшее количество какого бы то ни было химического элемента, которое может быть обнаружено спектроскопом.

Повторяя опыт много раз, можно для каждого сосуда определить продолжительность периода накопления гелия до того момента, когда его можно заметить в выделяющихся газах, и таким образом можно установить его количество. Я неоднократно получал таким способом гелий из солей урана и, как оказывалось, именно в таком количестве, какое может быть заранее вычислено из теории распада. На каждую тысячу тонн урана получается около двух миллиграммов гелия в год».

Что же получается в результате этого медленного радиоактивного превращения урана? Выше мы уже говорили о том, что радий должен быть одним из продуктов распада урана (хотя и не обязательно непосредственным продуктом). Это заключение мы основывали на том, что радий встречается всегда в рудах, которые содержат уран. Покажем теперь, что, зная продолжительность жизни урана и радия<sup>1</sup>, можно подвергнуть это заключение еще и некоторому количественному испытанию. Для того, чтобы понять, в чем заключается это испытание, вдумаясь в следующее рассуждение:

Продолжительность жизни радия составляет всего лишь 1600 лет — огромный срок по сравнению с продолжительностью человеческой жизни, но все же совершенно ничтожный по сравнению с продолжительностью жизни земного шара. Ясно, что имеющееся на земле количество радия должно все время восстанавливаться из какого-то источника: иначе оно давным давно пришло бы к концу задолго до того, как на земле появилось поколение физиков, которое оказалось способным открыть радий и изучить его свойства. Отсюда мы заключаем, что радий непрерывно возникает вновь из какого-то другого радиоактивного элемента, являющегося его предком. Предположим, что таким предком, т. е. необязательно отцом, а может быть прадедом или прапрадедом, является, как это весьма вероятно, уран. Как должны мы представлять себе процесс рождения и смерти радия? Если мы возьмем некоторое количество урана и предоставим этот уран самому себе, то атомы урана будут постепенно распадаться, превращаясь в атомы какого-то другого химического элемента; эти последние будут распадаться в свою очередь, превращаясь снова во что-то другое, и т. д. и т. д. пока, наконец, в качестве одной из ступеней этого последовательного процесса, не появ-

---

<sup>1</sup> Под «продолжительностью жизни» радиоактивного элемента мы всегда понимаем тот промежуток времени, в течение которого наличное количество атомов этого элемента должно уменьшиться вдвое.

вятся атомы радия, превращающиеся затем в атомы радона и т. д. Из всего этого следует, что если данное количество урана, например, килограмм, предоставлено самому себе, то через некоторое время в нем должно оказаться какое-то количество радия. Это количество радия сперва равнялось нулю, затем оно начало расти, но спрашивается, будет ли оно расти все время? Ясно, что все время расти оно не будет и что должна быть какая-то граница этого роста. Эта граница определяется, разумеется, не только тем, что из первоначально взятого килограмма урана не может получиться сколь угодно большого количества радия (если бы радий был конечным продуктом превращения и не подвергался дальнейшему превращению, то из килограмма урана не могло бы получиться больше, чем  $\frac{225,97}{238,14}$  килограмма радия, так как атомный вес радия составляет именно такую дробь от атомного веса урана). Граница роста радия установится еще раньше, потому что ведь атомы радия распадаются, а не являются конечным продуктом. Количество радия перестает расти в тот самый момент, когда число атомов радия, распадающихся в секунду, станет равно числу атомов радия, возникающих в секунду из радиоактивного элемента, являющегося непосредственным предшественником («отцом») радия. Когда этот момент наступит, то в дальнейшем количество радия уже расти не будет. Оно начнет уменьшаться, хотя и необычайно медленно, следуя за постепенным уменьшением запасов самого урана — родоначальника всей этой династии превращающихся друг в друга радиоактивных элементов. Но так как уран распадается настолько медленно, что по сравнению с радием его можно считать почти бессмертным, то мы пренебрежем этим медленным уменьшением количества радия и будем считать количество радия практически постоянным. Наступило «радиоактивное равновесие»: число уничтожающихся в секунду атомов радия равно числу рождающихся в секунду атомов



того же радия. Такое радиоактивное равновесие наступило не только для радия, но и для всех промежуточных элементов (между радием и ураном). Мы пока не знаем, каковы эти элементы, и даже сколько их; обозначим их попросту номерами (1, 2, 3, ...,  $n$ ). Наступившее для этих элементов (из которых 1-й является сыном урана, а  $n$ -й — отцом радия) радиоактивное равновесие обозначает следующее: число ежесекундно распадающихся атомов урана или, что то же самое, число ежесекундно возникающих атомов элемента 1 равно числу ежесекундно распадающихся атомов того же самого элемента 1, так как ведь он находится в радиоактивном равновесии. Но ведь это число есть не что иное, как число ежесекундно возникающих атомов элемента 2 и оно, в силу радиоактивного равновесия элемента 2, равно числу ежесекундно распадающихся атомов элемента 2, т. е., что то же самое, числу ежесекундно возникающих атомов элемента 3. Таким образом мы получаем длинную цепь равенств: одно число равно другому, другое третьему и т. д. В самом конце цепи стоит число ежесекундно распадающихся атомов элемента  $n$  или, что то же самое, число возникающих атомов радия, которое в силу радиоактивного равновесия радия, равно числу распадающихся ежесекундно атомов радия. Но всякому известно, что если мы имеем цепь равенств, где

$$a = b = c = \dots = y = z,$$

то мы всегда можем, если хотим, зачеркнуть все промежуточные члены и написать просто  $a = z$ . Так точно и здесь: в начале цепи стоит число ежесекундно распадающихся атомов урана; в конце цепи число ежесекундно распадающихся атомов радия. Поэтому мы можем утверждать, что, когда наступит равновесие, число ежесекундно распадающихся атомов урана будет попросту равно числу ежесекундно распадающихся атомов радия. Замечательный результат! Ведь мы вывели его с математической строгостью, совершенно ничего не зная

о том, сколько есть промежуточных радиоактивных элементов между ураном и радием и каковы их свойства. А из этого результата сейчас же вытекает другой, еще более замечательный. Ведь мы знаем, что из заданного количества атомов радия ежесекундно распадается доля, равная дроби  $1,4 \cdot 10^{-11}$ . А из заданного количества атомов урана ежесекундно распадается доля, равная дроби  $5 \cdot 10^{-18}$ . Поэтому, когда наступило радиоактивное равновесие, то наличное количество атомов радия, помноженное на  $1,4 \cdot 10^{-11}$ , должно равняться наличному количеству атомов урана, помноженному на  $5 \cdot 10^{-18}$ . Иными словами, число атомов радия должно равняться числу атомов урана, помноженному на  $3,5 \cdot 10^{-7}$ . Таким образом мы получаем чисто теоретически, из теории радиоактивного распада Резерфорда и Содди, следующий результат:

Во всякой урановой руде, которая находится в недрах земли так долго, что в ней успело уже наступить радиоактивное равновесие, число атомов радия должно быть в три миллиона раз меньше числа атомов урана. Так как атомный вес радия лишь не намного меньше атомного веса урана, то, иными словами, в каждой такой руде грамм радия должен приходиться на три тонны ( $3 \cdot 10^6$  г) урана.

Этот теоретический вывод был проверен Резерфордом и Болтвудом. Они исследовали химический состав очень большого количества урановых руд и обнаружили, что за очень немногими исключениями содержание радия в руде всегда строго пропорционально содержанию в ней урана. И отношение между количеством урана и количеством радия оказалось такое же самое, какого требовала теория: по измерениям Резерфорда и Болтвуда один грамм радия приходится в среднем на 3,2 тонны чистого урана! (небольшое расхождение между этим числом и числом, выведенным теоретически, объ-

ясняется, конечно, большими трудностями измерения). Теория радиоактивного распада отпраздновала еще одну победу.

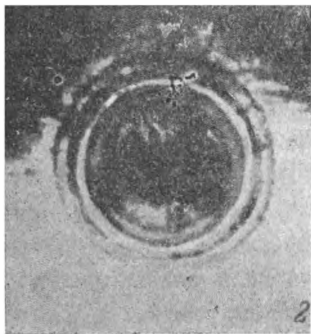
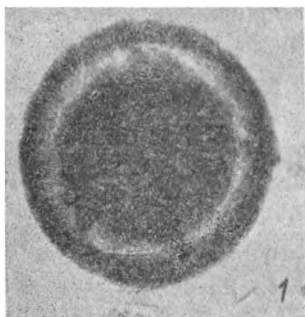
Наконец, еще одно важное заключение вытекает из вычисленной продолжительности жизни урана. Рассмотрим обыкновенный кусок урановой смоляной руды, количество урана в которой составляет 50% веса всей руды. Спросим себя — как долго мог этот кусок руды пролежать в земле? Даже если бы он первоначально состоял из одного лишь чистого урана, он не мог бы лежать в земле больше четырех с половиной или пяти миллиардов лет, потому что в этом случае больше половины его перестало бы быть ураном и превратилось бы в другие химические элементы. Отсюда следует, что возраст куска урановой руды, в которой содержание урана достигает 50%, не может быть больше пяти миллиардов лет.

Это простое и ясное заключение указывает на то, какие неожиданные применения может иметь наука о радиоактивности. Радиоактивные явления дают нам как бы своеобразные часы, с помощью которых мы можем измерять продолжительность протекших огромных геологических эпох. Вопрос о времени всегда был одним из наиболее болезненных вопросов геологии. Наблюдая различные пласты земной коры, геолог более или менее уверенно говорит о той последовательности, в которой различные геологические эпохи сменяли друг друга, но он большей частью становится втупик, когда ему предлагают определить продолжительность этих эпох. Иногда он пытается делать примерные оценки сроков, исходя из того, что он приблизительно представляет себе, с какой скоростью могли бы откладываться те или иные наносы, но эти оценки всегда бывают очень гадательны. Отложения, выпадающие из воды каких-нибудь рек и т. п., нарастают с различной скоростью, в зависимости от быстроты течения, рельефа дна и других обстоятельств, и не всегда геолог, пытающийся восстановить прошлую историю земли, имеет достаточные познания о том, как эти обстоятельства

складывались в том или ином случае. Но радиоактивность не обладает всеми этими недостатками: уменьшение количества урана в урановой смоляной руде, лежащей в недрах земли, должно происходить с абсолютной точностью, «по часам», с величайшим безразличием ко всем внешним влияниям. И геологи поняли, что если они хотят получить безошибочные точные сведения о продолжительности залегания в земной коре тех или иных минералов, если они хотят установить хронологию тех жутко отдаленных от нас времен, когда еще не существовало человечества, а может быть не было и самой жизни, — они должны обратиться к помощи радиоактивных элементов — самых безошибочных часов на свете.

Геологи уже давно с любопытством рассматривали маленькие окрашенные кружки, которые встречаются в некоторых сортах слюды — в биотите, кордиерите и мусковите. Происхождение этих кружков оставалось совершенно непонятным, и лишь в 1907 году английский геолог Джоли указал, наконец, на истинную причину появления этих окрашенных кружков («плеохроических ореолов», как их называли геологи). Джоли обратил внимание на то, что альфа-лучи радиоактивных элементов обладают способностью затемнять или окрашивать многие прозрачные тела. Вилльям Крукс пробовал действовать в течение нескольких недель альфа-лучами радия на большой бесцветный алмаз. К концу опыта алмаз принял густую зеленую окраску. Стекло и слюда темнели после того, как в течение продолжительного времени подвергались воздействию тех же самых лучей. Не вызываются ли и плеохроические ореолы действием альфа-лучей? Такая мысль пришла в голову Джоли, и он измерил под микроскопом радиусы этих ореолов с целью узнать, нет ли какой-нибудь связи между ними и длиной пробега альфа лучей в слюде. Среди альфа-частиц, испускаемых препаратами радия (большая часть которых принадлежит, как мы уже знаем, не самому радью, а дальнейшим продуктам его распада), наиболь-

шей скоростью и, следовательно, наибольшим пробегом обладает некоторая определенная группа альфа-частиц, пробег которой в слюде равен 0,03 мм. Когда Джоли измерил радиусы плеохроических ореолов, то оказалось, что в большинстве случаев эти радиусы равны как раз 0,03 мм! Поэтому Джоли высказал следующее предположение: причиной плеохроических ореолов (или венчиков, как их еще называют) являются маленькие крупинки радиоактивного вещества, вкрапленные в



Радиоактивные венчики (1 — в слюде, 2 и 3 — в полевом шпате).

На рис. 1 черный круг в середине образован альфа-частицами урана и его продуктов распада до радия включительно (граница внутреннего круга), наружный край более светлого кольца соответствует пробегу альфа-частиц радона, а наружный край внешнего темного кольца — альфа-частицам радия С. На рис. 2 отчетливо видны альфа-пробег элементов от урана до радия А (полные кольца); от кольца, образованного радием С, виден лишь верхний полукруг. На рис. 3 видны кольца, образованные элементами от урана до радия, от кольца, образованного полонием, осталось лишь несколько точек.

слюду как раз в центре ореола. Эти крупинки, которые в некоторых случаях действительно удавалось обнаружить в микроскоп, испускают во все стороны свои альфа-частицы. Альфа-частицы пробегают некоторое расстояние внутри однород-

ной слюды и останавливаются, застревая на расстоянии, равном длине пробега этих частиц, от центра ореола. Получается шар, центр которого совпадает с вкрапленным кусочком радиоактивного вещества. При срезе можно наблюдать то самое круглое сечение, которое и было замечено геологами. Джоли указал на то, что в некоторых случаях попадаются хорошо развитые ореолы, которые обнаруживают сложную структуру. Это объясняется тем, что различные радиоактивные элементы испускают альфа-лучи с различной длиной пробега. В результате получаются концентрические кольца, радиусы которых соответствуют различным длинам пробега.

Вид плеохронического ореола, как указал Джоли, может быть различным в зависимости от возраста минерала. Самые молодые минералы, в которых из урана, находившегося в радиоактивном включении, еще не успело образоваться достаточно большое число атомов, являющихся потомками радия, обладают плеохроническими ореолами с радиусом только 0,013 мм. Более древние минералы обнаруживают и внешнее кольцо с радиусом 0,03 мм и промежуточные кольца. Внимательно изучая эти еле видимые окрашенные венчики в слюде, Джоли определял с довольно большой уверенностью возраст минерала, пролежавшего в земной коре длинный ряд веков. Сравнивая густоту окраски венчика с густотой окраски, вызванной искусственно в слюде, подвергаемой действию известного числа альфа-частиц, Джоли мог оценить возраст некоторых образцов слюды, который оказался равным сотням миллионов лет. Количество урана, находившееся в радиоактивном включении в одном исследованном Джоли образце, равнялось  $5 \cdot 10^{-10}$  гр. Это невообразимо маленькое количество урана испускает всего лишь одну альфа-частицу каждые десять часов. И все же это оказалось достаточным для того, чтобы за сотни миллионов лет образовался нежный плеохронический венчик, способный рассказать внимательному геологу историю длинных геологических эпох.

Немецкий ученый Мюгге систематически исследовал множество различных минералов, ища в них плеохроические венчики. Он нашел, что голубой плавиковый шпат из Вольсендорфа обнаруживает плеохроические венчики в большем количестве и более разнообразные, нежели какой бы то ни было другой минерал. Концентрические слои видны еще отчетливее, чем в слюде. И радиусу каждого такого слоя соответствует (по длине пробега в плавиковом шпате) одна из групп альфа-частиц, испускаемых ураном и его радиоактивными потомками.

В настоящее время уже невозможно сомневаться в том, что плеохроические ореолы действительно имеют радиоактивное происхождение, как это предположил Джоли. Внимательное изучение окраски драгоценных камней вероятно тоже покажет, что и она, быть может, обязана своим происхождением действию лучей радиоактивных веществ, — быть может самого ничтожного количества этих веществ, но действующего в течение огромнейших промежутков времени. Таким образом, основываясь на мелких, но безошибочных признаках, геологи умеют восстановить длинную историю земной коры и с уверенностью оценить продолжительность геологических эпох.

Объяснение плеохроических венчиков, которое дал Джоли, можно сравнить с открытиями Шамполлиона и Гротефенда, расшифровавших непонятные письма давно исчезнувших народов. И подобно тому, как историки вслед за тем сумели шаг за шагом восстановить судьбу этих народов, точно так же и геологи, пользуясь открытием Джоли, читают историю минералов, написанную еле заметными пятнышками окраски, еле заметными плеохроическими венчиками.

## *Глава пятая*

### СТРОЕНИЕ АТОМА

В 1906 году Резерфорд случайно заметил одно явление, с виду неинтересное и незначительное, но на самом деле оказавшееся необыкновенно важным и сыгравшее огромную роль в дальнейшем развитии физики. Резерфорд изучал фотографическое действие альфа-лучей. Для этого он пропускал альфа-лучи через узкую щель, за которой помещалась фотографическая пластинка. Все это было расположено внутри стеклянного сосуда. И вот Резерфорд заметил, что, когда из сосуда выкачан воздух, изображение щели на пластинке, производимое альфа-лучами, получается очень резкое и отчетливое. Но стоит только впустить в сосуд воздух, как изображение щели становится шире и его края размываются.

Это явление Резерфорд совершенно правильно объяснил так: альфа-частицы движутся по идеальным прямым линиям только в том случае, если их путь проходит через безвоздушное пространство. Если же пространство наполнено воздухом, то альфа-частицы сталкиваются с атомами азота и кислорода, и при каждом таком столкновении слегка изменяют направление своего пути. Поэтому первоначальный пучок альфа-лучей, в котором были альфа-частицы, двигавшиеся только в строго параллельных друг другу направлениях, становится слегка размытым: в нем появляются альфа-частицы, движущиеся по слегка различным направлениям. Происхо-



дит, как принято говорить, рассеяние альфа-лучей.

Явление рассеяния альфа-лучей исследовали затем помощники Резерфорда — Гайгер и Марсден. Они изучали, каким образом рассеивается пучок альфа-лучей при прохождении не только через воздух, но и через твердые тела — через листки различных металлов и тонкие слои других веществ. При этом они применяли не фотографический способ, а способ вспышек: за листком, через который они пропускали тонкий пучок альфа-лучей, ставился экран, покрытый сернистым цинком. Если листок убрать, то альфа-лучи вызывают свечение экрана только в одной его точке — в той, куда падает прямолинейный пучок альфа-лучей. Но если по дороге поставить листок, то картина меняется. Маленькое ярко светящееся пятно на экране исчезает, и вместо него появляется целая светящаяся область: пятно как бы расплозлось и стало менее ярким, а при наблюдении в микроскоп можно видеть, что оно состоит из отдельных вспышек, как в спинтарископе Крукса. Это объясняется тем, что пучок альфа-частиц, пройдя через металлический листок, рассеялся: альфа-частицы меняли свое направление движения, сталкиваясь с атомами металла.

Во всем этом пока нет совершенно ничего удивительного. Но в 1909 году, занимаясь такими опытами, Гайгер и Марсден однажды поставили флюоресцирующий экран не в том месте, где обычно, — не за металлическим листком, рассеивающим альфа-частицы, — а перед этим листком, т. е. с той же самой стороны листка, с которой падали альфа-частицы. При этом сам экран был защищен от непосредственного действия альфа-лучей, исходящих из этого источника. Казалось бы, что в этих условиях на экран не должна упасть ни одна альфа-частица: ведь все предыдущие опыты указывали на то, что направление движения альфа-частиц при прохождении их через экран изменяется сравнительно мало. Но Гайгер и Марсден, к своему огромному удивлению, увидели, что

на экране все-таки появляются вспышки. Хотя их и не очень много, но все же это чрезвычайно удивительно: это показывает, что некоторые альфа-частицы, попадающие на экран, меняют направление своего движения настолько сильно, что возвращаются в ту же сторону от листка, откуда пришли. Число этих альфа-частиц, повернувших на такие большие углы (больше девяноста градусов), сравнительно очень невелико, и оно, как показали опыты Гайгера и Марсдена, сильно зависит от атомного веса того металла, из которого сделан рассеивающий листок. Чем атомный вес больше, тем больше и число альфа-частиц, отклонившихся от своего первоначального пути на ненормально большой угол. Если листок сделан из платины, то на каждые восемь тысяч альфа-частиц, падающих на него, приходится одна, отклоняющаяся на угол, превышающий девяноста градусов.

Когда помощники Резерфорда рассказали ему об этих опытах, он стал усиленно думать о том, что все это могло бы означать. Альфа-частица, рассуждал Резерфорд, несет на себе электрический заряд. Для того, чтобы заставить ее (при ее чудовищно огромной скорости) повернуться на такой большой угол, необходимо какое-то столь же чудовищное огромное электрическое или магнитное поле. Вероятно, такие огромные поля действительно имеются в тех атомах, с которыми сталкивается альфа-частица. Иначе никак не объяснить, почему альфа-частица может, проходя через металлический листок, внезапно повернуться на такой угол и вернуться чуть ли не по тому же самому направлению, откуда она только что пришла.

Вот какой вывод сделал Резерфорд из опытов своих помощников Гайгера и Марсдена. В атоме существуют какие-то поля огромной силы. Эти поля сосредоточены в очень маленьком объеме, и поэтому не каждой альфа-частице посчастливится туда попасть. То, что объемы, в которых заключены эти большие поля, действительно очень малы, можно понять

из следующего: предположим, что потоком альфа-частиц мы обстреливаем, как в опытах Гайгера и Марсдена, листок, состоящий из платины. Платина — твердое тело, и ее атомы плотно упакованы, почти касаясь друг друга (в противном случае платину было бы очень легко сжать, заставив атомы прижаться друг к другу еще плотнее, но на самом деле это сделать очень трудно, почти невозможно). Ясно, что каждая альфа-частица, вошедшая в платиновый листок, должна сейчас же наталкиваться на атомы. Тем не менее опыты Гайгера и Марсдена, описанные только что, показывают, что из 8000 альфа-частиц, упавших на листок платины, 7999 проходят этот листок насквозь, почти даже не сбившись с направления своего первоначального пути, как будто бы для альфа-частицы пробить атом насквозь — это все равно, что ружейной пуле пройти через облако дыма. И только одна альфа-частица из восьми тысяч как будто натывается на что-то плотное, твердое, непроницаемое, от чего она отскакивает обратно. Ясно, что это «что-то» (электрическое поле чудовищной силы, как предположил Резерфорд) должно занимать какую-то очень маленькую часть всего объема атома. Атом состоит — так заключил Резерфорд — из очень маленькой сердцевины, совершенно непроницаемой для быстрых альфа-частиц, и из гораздо больших по размерам окружающих частей, через которые альфа-частица проходит почти совершенно свободно. Внутреннюю часть можно сравнить с косточкой, наружную — с мякотью плода.

Как же должен быть устроен атом, — продолжал размышлять Резерфорд, — для того, чтобы во внутренней маленькой его части было такое сильное поле, непроницаемое для альфа-частиц? То, что в атоме обязательно должны быть какие-то электрические поля, было совершенно ясно каждому физiku уже довольно давно. Ведь внутри атома существуют электроны, которые можно оттуда разными способами извлекать, например электрическим полем, как это делается в раз-

рядной трубке Крукса. Раз есть электроны, то должны быть и какие-то положительные заряды: ведь атом, взятый как целое, электрически нейтрален, и в нем поэтому должны быть положительные заряды, которые уравнивали бы собой отрицательный заряд электронов. А раз есть и отрицательные и положительные заряды, то должны же быть и электрические поля. Весь вопрос заключается лишь в том, как должны быть расположены эти отрицательные и положительные заряды друг относительно друга, для того, чтобы в сердцевине атома получилось очень сильное электрическое поле, заставляющее альфа-частицу, вошедшую в него, отразиться и уйти обратно, а во внешних частях атома — очень слабое поле, почти не сбивающее альфа-частицу с ее пути. Этот вопрос и предстояло разрешить Резерфорду.

В то время, когда он задумывался над этой важной задачей, некоторые физики считали, что знают, как расположены в атоме положительные и отрицательные заряды. Сэр Джон Джозеф Томсон — тот самый, который впервые доказал, что электроны катодных лучей являются частицами почти в две тысячи раз более легкими, чем самый легкий атом — в своих лекциях подробно рассматривал вопрос о расположении положительных и отрицательных зарядов атома. Он учил, что каждый атом есть шарик, состоящий из какой-то материи, заряженной положительным электричеством, и что в этот шарик положительно-заряженной материи вкраплены в разных местах, более или менее равномерно, отрицательно заряженные электроны. Они как бы плавают в положительно заряженной среде и могут в ней совершать колебания — вперед и назад, вперед и назад. Когда электрон совершает такие колебания, то из атома во все стороны бегут электромагнитные волны: атом испускает свет. Количество положительно заряженной материи в атоме совершенно определенное; оно должно быть точь в точь таким, чтобы полный заряд всей этой положительной материи атома совершенно точно

равнялся по величине (но, разумеется, не по знаку) сумме зарядов всех отрицательных электронов. Полный заряд всего атома в целом равен сумме заряда его положительной материи и зарядов его отрицательных электронов; поэтому он равен сумме двух одинаковых чисел, из которых одно положительное, а другое отрицательное. Иными словами, полный заряд всего атома равен нулю (он перестает быть нулем только если выдернуть из атома один или несколько электронов или же, наоборот, всадить в него один или несколько добавочных электронов: тогда он превращается в положительно заряженный или отрицательно заряженный ион).

Такова была та увлекательная картина внутреннего устройства атома, которую рисовал в своих лекциях Дж. Дж. Томсон, — знаменитая «модель атома Томсона». Эта модель очень нравилась физикам, потому что она довольно хорошо объясняла множество фактов. И хотя в ней было не мало гадательного и недоказанного, тем не менее физики верили ей: ведь атомы Дальтона в свое время тоже были гадательной и недоказанной гипотезой, и еще за несколько лет перед этим (в 1902 году) известный немецкий химик Оствальд, издеваясь над атомами, говорил, что объяснять химические явления атомами так же глупо, как объяснять действие паровоза тем, что там спрятана лошадь, которая тащит все вагоны. И все-таки, не прошло несколько лет, как все физики и химики должны были поверить в атомы, в том числе и сам Оствальд. Как знать? Может быть и гипотеза Томсона о внутреннем устройстве атома также окажется совершенно правильной, как и гипотеза Дальтона?

Но на этот раз дело было не так. Чем больше размышлял Резерфорд над опытами Гайгера и Марсдена, тем яснее он видел, что модель Томсона совершенно никуда не годится. Ведь в этой модели электроны довольно равномерно рассеяны по всему атому, уравнивая своим отрицательным за-

рядом заряд той положительной материи, из которой состоит основная часть атома. Выходит по Томсону, что не только весь атом в целом не заряжен электричеством (полный заряд равен нулю), но даже если мыотрежем мысленно от него какой-нибудь ломтик, то заряд электронов, вкрапленных в этот ломтик будет приблизительно (если не вполне точно) уравновешивать заряд положительной материи ломтика. Каким же образом тут могут возникнуть большие электрические поля? В какое бы место атома ни попала альфа-частица, она повсюду встретит приблизительно одно и то же слабое электрическое поле. Модель Томсона могла бы объяснить рассеяние пучка альфа-частиц на очень маленький угол, но она никак не может объяснить рассеяния на те большие углы, которые Гайгер и Марсден наблюдали в своих опытах.

Поэтому Резерфорд и решил: неверно, что положительный заряд атома размазан по всему объему атома, как думает Томсон. Положительный заряд должен быть, наоборот, сконцентрирован в очень маленьком объеме, во внутренней сердцевине атома, а отрицательно заряженные электроны должны быть расположены не внутри объема, занятого положительным зарядом, как думает Томсон, а снаружи. Иными словами, атом состоит из положительно заряженного центрального ядра, которое находится внутри атома, образуя его сердцевину, и из хоровода отрицательных электронов, которые находятся в наружной его части.

Так возникла «ядерная модель атома», которую Резерфорд выставил вместо модели Томсона. Так было впервые произнесено слово «ядро атома».

Чем же модель Резерфорда лучше, чем модель Томсона, и как можно с помощью модели Резерфорда объяснить опыты с рассеянием альфа-частиц? Предположим, что атом устроен так, как думает Резерфорд. Что случится с альфа-частицей, которая столкнется с таким атомом?

Ответ на этот вопрос будет разным, в зависимости от того

на каком расстоянии от ядра пройдет альфа-частица. Если альфа-частица промчится мимо атома на таком расстоянии от положительно заряженного ядра, что между ядром и пролетающей альфа-частицей еще останется вся или почти вся наружная часть атома, состоящая из отрицательных электронов, то альфа-частица не испытает на себе действия больших сил. Ведь ядро атома будет отталкивать ее от себя (положительный заряд альфа-частицы должен отталкиваться от всякого положительного заряда и притягиваться ко всякому отрицательному), а наружная оболочка атома, состоящая из отрицательно заряженных электронов, будет притягивать к себе альфа-частицу. В результате этого на альфа-частицу действуют сразу две приблизительно одинаковые по величине силы, — электроны притягивают ее к атому примерно с такой же силой, с какой ядро атома ее отталкивает, — и сумма этих сил будет очень близка к нулю. Поэтому альфа-частица, пронизывающая наружную оболочку атома, пройдет через атом, почти не заметив этого и, если и отклонится, то на очень маленький угол.

Иное произойдет с альфа-частицей, которой посчастливится попасть глубоко внутрь атома, на очень небольшое расстояние от центрального ядра. Электронная внешняя оболочка атома осталась снаружи и значит уже не оказывает на альфа-частицу никакого действия. Ведь когда альфа-частица забралась внутрь, то оставшиеся снаружи электроны тянут ее к себе в самые разнообразные стороны, по всем направлениям — как лебедь, рак и щука, а поэтому все их усилия взаимно уничтожаются. Значит, действие электронов на альфа-частицу уже можно не принимать во внимание. Остается только положительно заряженное ядро, которое теперь отталкивает альфа-частицу изо всей силы, не препятствуемое ничем. И чем ближе подходит к ядру альфа-частица, тем больше и больше становятся те силы, с которыми ядро ее отталкивает. Если только считать, что размеры ядра очень малы,

то на его поверхности должно существовать чудовищное по силе электрическое поле, отталкивающее альфа-частицу. При удалении от ядра это поле быстро ослабевает, а поэтому поле огромной силы, действительно непроницаемое даже для очень быстрых альфа-частиц, должно действовать лишь в небольшой части всего объема атома.

Мы видим, что картина внутреннего устройства атома, нарисованная Резерфордом, действительно очень хорошо объясняет опыты Гайгера и Марсдена. Те немногие альфа-частицы (одна из 8000 в случае платинового листка), которые отклонились при рассеянии так сильно, что вынырнули из листка с той его стороны, откуда пришли, — это альфа-частицы, побывавшие в глубоких недрах атома, вблизи самого ядра. Таких альфа-частиц очень мало: ведь ядро занимает всего лишь ничтожную часть объема атома, а поэтому альфа-частицы, которыми мы обстреливаем металлический листок, имеют лишь очень маленькую вероятность попасть именно в ядро. Громадное большинство альфа-частиц успевает пройти насквозь всю толщину листка, нигде не столкнувшись с обнаженным ядром. Эти альфа-частицы видели перед собой лишь ядра, отталкивающее действие которых было в огромной степени ослаблено притягивающим действием окружающей их электронной оболочки атома. Такие альфа-частицы могли, проходя через листок, рассеяться лишь в очень небольшой угол.

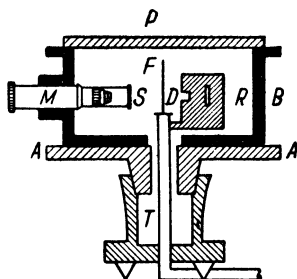
Для того, чтобы окончательно проверить правильность своих взглядов, Резерфорд решил проделать математический расчет. Он рассуждал так: рассмотрим атом, в котором имеется определенное число электронов. Обозначим это число электронов буквой  $Z$ . Итак, в атоме есть  $Z$  электронов, когда этот атом не ионизован, т. е. когда полный заряд его равен нулю. Каждый электрон несет на себе один отрицательный элементарный заряд. А так как всего в атоме имеется  $Z$  электронов, то полный отрицательный заряд атома состоит



из  $Z$  элементарных зарядов. Значит остальной — положительный — заряд атома, сосредоточенный в его ядре, должен состоять из  $Z$  положительных элементарных зарядов. Число  $Z$ , определяющее заряд ядра и равное числу электронов в нейтральном (неионизованном) атоме, определяет собою и то электрическое поле, которое существует в глубине атома, в пространстве между ядром и электронной оболочкой атома. Необходимо рассчитать, как это поле рассеивает попадающий туда пучок альфа-частиц. Вот Резерфорд и стал решать такую математическую задачу: на ядро, несущее на себе заряд, равный  $Z$  положительным элементарным зарядам, падает поток альфа-частиц; каждая альфа-частица несет на себе два положительных элементарных заряда. Альфа-частицы падают совершенно случайным, беспорядочным образом: все они летят, правда, строго в одном и том же направлении, но если взять плоскость, перпендикулярную этому направлению, то в среднем дождь альфа-частиц совершенно равномерно падает на эту плоскость. Число альфа-частиц, падающее на каждый квадратный сантиметр этой плоскости в течение каждой секунды, известно; известна также и скорость альфа-частиц. Нужно найти число альфа-частиц, рассеянное ядром под всеми возможными углами: например сказать, сколько частиц будет в секунду падать на квадратный сантиметр экрана, расположенного под таким-то и под таким-то углом, на таком-то расстоянии от ядра. Заметим, что решение этой задачи не было особенно трудным, потому что движение альфа-частицы, рассеиваемой ядром атома, весьма напоминает движение кометы, описывающей свой путь вокруг солнца. Различие только в том, что комета притягивается к солнцу, а альфа-частица отталкивается от ядра, но все же сходство между обеими задачами настолько велико, что Резерфорд мог, взяв учебник астрономии, найти в нем почти все нужные вычисления. Итак Резерфорд написал математическую формулу, которую он мог применить к рассеянию альфа-частиц на

большие углы ядрами любых атомов, если бы только было известно число  $Z$  для этих атомов. Эту формулу предстояло проверить на опыте. Если она окажется справедливой, то «ядерная модель атома», предложенная Резерфордом, правильна (мы не пишем здесь формулы Резерфорда, потому что она довольно сложна, но суть дела всегда можно понять и без громоздких математических выкладок).

В 1913 году Гайгер и Марсден принялись проверять выведенную Резерфордом формулу. Для этого они построили



Прибор Гайгера и Марсдена.

прибор, который изображен здесь на рисунке. В толстостенном металлическом цилиндре B содержится источник альфа-частиц R, рассеивающий металлический листок F, и экран S, покрытый сернистым цинком и скрепленный с микроскопом M. Цилиндр смонтирован на круглой платформе A, окружность которой снабжена шкалой, и может вращаться вместе с ней (основание платформы плотно пригнано к трубе C, в которой оно может поворачиваться). При вращении цилиндра микроскоп и экран с сернистым цинком вращаются вместе с ним, но источник альфа-лучей и рассеивающий листок остаются неподвижными. Цилиндр накрыт толстым стеклом P; через трубу T из него может быть откачан воздух. Источником альфа-лучей служила трубочка, наполненная ра-

доном. Диафрагмой D выделялся узкий пучок альфа-лучей, падавший затем перпендикулярно на рассеивающий листок F. Поворачивая платформу A, можно было считать с помощью вспышек на экране из сернистого цинка число альфа-частиц, рассеянных под тем или иным углом.

Эти опыты Гайгера и Марсдена подтвердили все теоретические выводы Резерфорда. Опыты показали, что если подставить вместо числа  $Z$  (так мы обозначили число положительных элементарных зарядов, которое содержится в ядре атома) величину, приблизительно равную половине атомного веса того вещества, из которого состоял рассеивающий листок, то согласие числа вспышек, наблюдавшихся под разными углами и при разных толщинах листка, с формулой Резерфорда получалось совершенно полное.

Таким образом теория Резерфорда была полностью подтверждена и вместе с тем оказалось, что число элементарных зарядов в положительном заряде ядра атома приблизительно равно половине его атомного веса. Значит и число электронов в атоме приблизительно равно половине его атомного веса.

Впоследствии ученик Резерфорда Дж. Чэдвик произвел по аналогичному же способу гораздо более точное измерение заряда ядра. У него получилось, что ядро меди имеет приблизительно 29 положительных элементарных зарядов, ядро серебра — 46, ядро платины — 77. За эти числа он не вполне ручался, потому — что могла быть небольшая ошибка, происходящая вследствие неточности опытов, но во всяком случае, как утверждал Чэдвик, ошибка не могла быть больше, чем один или два процента. Атомные веса меди, серебра и платины равны 63,52 (медь), 107,82 (серебро), 195,1 (платина). Отсюда видно, что заряд ядра, измеренный в элементарных зарядах (т. е. как раз то число, которое мы обозначаем буквой  $Z$ ) все же заметно меньше, чем половина атомного веса.

В 1913 году голландский физик ван-ден-Брук, размышляя об этих произведенных в Англии опытах над рассеянием альфа-частиц, случайно обратил внимание на то обстоятельство, что число  $Z$  (заряд ядра, выраженный в положительных элементарных зарядах), измеренное в этих опытах, очень близко подходит к номеру места соответствующего химического элемента в периодической таблице. Если мы посмотрим на периодическую таблицу или на наш список химических элементов, где элементы расположены в таком же самом порядке, то мы увидим следующее:

медь стоит на 29-м месте в списке,

серебро стоит на 47-м месте в списке,

платина стоит на 78-м.

Возможно, говорил ван-ден-Брук, что те небольшие расхождения, которые существуют между номерами элементов в списке и результатами измерения при наблюдении рассеяния альфа-частиц, связаны только с ошибками опыта (ведь измерения никогда не бывают абсолютно точны; в них всегда есть какие-то хотя бы и маленькие погрешности). Вполне возможно, что в результате совершенно точных измерений рассеяния альфа-частиц оказалось бы, что у меди  $Z=29$ , у серебра  $Z=47$ , у платины  $Z=78$ . Иными словами, ван-ден-Брук выставил следующую гипотезу.

У каждого химического элемента число  $Z$  (т. е. число электронов в атоме, когда атом в целом нейтрален, или, что то же самое, положительный заряд ядра, выраженный в элементарных зарядах) в точности равно номеру места, занимаемого этим элементом в периодической таблице Менделеева.

Из гипотезы ван-ден-Брука вытекает следующая картина внутреннего устройства отдельных атомов.

Атом водорода. Это самый простой из всех атомов. Он состоит из ядра и из одного электрона, находящегося вне

ядра. Заряд ядра такой же величины, как и заряд электрона (знак заряда, разумеется, другой).

**Атом гелия.** Он состоит из ядра и из двух электронов. Заряд ядра равен удвоенному заряду электрона с обратным знаком. Если у атома гелия отнять его два электрона, то остается ядро и больше ничего. А так как мы знаем, что альфа-частица это атом гелия, несущий на себе два положительных элементарных заряда, или, что то же самое, атом гелия, у которого отнято два электрона, то остается заключить, что альфа-частица есть ядро атома гелия. Атом гелия состоит из альфа-частицы и из двух электронов. (Заметим, что способность альфа-частицы глубоко проникать внутрь атомов давно могла бы навести нас на мысль о том, что альфа-частица, будучи ионом гелия, заряженным двумя положительными элементарными зарядами, имеет размеры чрезвычайно малые по сравнению с размерами атома и вероятно является попросту ядром гелия).

**Атом лития.** Он состоит из ядра и из трех электронов. Заряд ядра лития равен тройному положительному элементарному заряду.

Этот список мы можем продолжать и дальше. Последним в списке будет стоять уран.

**Атом урана.** Это самый сложный из всех известных атомов. Он состоит из 93 тел: ядра и 92 электронов. Заряд ядра равен помноженному на 92 заряду электрона (с обратным знаком).

Гипотеза, выставленная ван-ден-Бруксом, была сразу же принята всеми физиками, несмотря на то, что настоящие решающие доказательства ее правильности пришли гораздо позже. Помимо простоты и заманчивости самой гипотезы большую роль в этом сыграло также и то обстоятельство, что физиков давно уже перестал удовлетворять тот принцип, по которому Менделеев расположил химические элементы в ряд — принцип возрастания атомного веса.

Если мы внимательно рассмотрим список элементов приведенный на стр. 52, то увидим, что хотя в основном элементы расположены в порядке атомного веса, тем не менее в отдельных местах попадают и исключения. Этих исключений очень мало, но все они чрезвычайно многозначительны. Взглянем на место 52 и 53 нашей таблицы. На месте 52 стоит теллур, атомный вес которого равен 127,5. На месте 53 — иод с атомным весом 126,92.

Если бы мы строго придерживались порядка атомных весов, то мы, конечно, расположили бы эти два элемента в обратном порядке: иод на место 52, теллур — на место 53. Но всякий, кто хоть немножко знаком с химией, сразу увидит, что это сейчас же испортило бы весь строй и порядок периодической системы. По своим химическим свойствам иод принадлежит к числу так называемых галоидов, какими являются фтор, хлор и бром. Все они образуют химические соединения совершенно одинакового типа например галоидоводородные кислоты:  $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HBr}$ ,  $\text{HI}$ ) и все стоят в периодической таблице непосредственно перед благородными газами (фтор перед неоном, хлор перед аргоном, бром перед криптоном). Если в периодическом законе Менделеева есть хоть капля здравого смысла, то иод должен стоять непосредственно перед благородным газом — ксеноном.

С другой стороны известно, что химическое поведение теллура похоже на поведение селена и серы. Таким образом совершенно ясно, что порядок элементов должен быть такой: теллур, иод, ксенон, а не иод, теллур, ксенон. А между тем точные химические измерения упорно указывают на то, что атомный вес теллура больше атомного веса иода.

Мы ограничимся только этим одним примером; другие примеры (аргон и калий, кобальт и никкель) имеют такой же характер. Из этих примеров ясно, что хотя периодический закон Менделеева действительно является законом огромной важности, вносящим ясность и простоту в путаницу химиче-

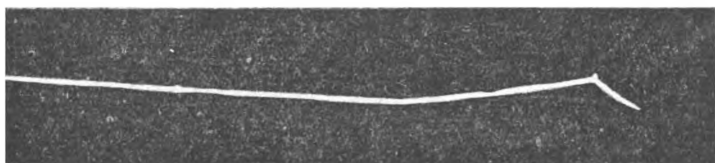
ских явлений — тем не менее основным организующим признаком, по которому следует расположить элементы, чтобы обнаружить свойственные им закономерности, является совсем не атомный вес.

Должен существовать какой-то количественный признак, характеризующий атомы, признак, от которого свойства атомов зависят по указанному Менделеевым закону, но этот признак должен быть совсем не атомным весом. Атомный вес, вообще говоря, идет в ногу с этим признаком, возрастая вместе с ним, но не совсем строго и точно, и в трех местах (аргон — калий, кобальт — никкель, теллур — иод) обнаруживается расхождение между ними. (Когда мы впервые приводили таблицу элементов на стр. 53 и говорили, что располагаем все химические элементы в порядке возрастания их атомного веса, то об этих трех исключениях мы умолчали: мы отчасти рассчитывали на невнимательность читателя, рассчитывали на то, что он не заметит этих трех исключительных мест).

Что же это за организующий признак, по которому в действительности располагаются химические элементы в периодической таблице? По гипотезе ван-ден-Брука этот признак — заряд ядра.

Заряд ядра определяет собой, прежде всего, число электронов, которое располагается вокруг него, когда атом находится в своем обычном наэлектризованном состоянии. Это число должно быть равно  $Z$ . Зарядом ядра определяется и электрическое поле, в котором располагаются эти электроны, привязанные к ядру силами электрического притяжения. Поэтому все внутреннее устройство атома, все детали распределения электронов в нем и т. п., — все это должно определяться зарядом ядра. Вес же ядра, от которого зависит вес всего атома, должен играть сравнительно второстепенную роль. Поэтому нет ничего удивительного в том, что именно заряд ядра, а не его вес, определяет все важнейшие свойства атома.

Из гипотезы ван-ден-Брука вытекает еще одно важное следствие. А именно, так как число электронов в атоме, как мы видим из сравнения атомных весов элементов с их номерами в нашем списке, в общем, примерно равно половине атомного веса, а большей частью даже меньше (исключение — водород), и во всяком случае никогда не бывает больше атомного веса, то следовательно общий вес всех электронов всегда представляет ничтожную долю веса самого атома. У водородного атома на долю электрона падает около



Конец пути альфа-частицы в воздухе. Видны два излома, образовавшиеся при столкновении альфа-частицы с ядрами атомов.

0,00054 веса всего атома, в атоме гелия вес электронов составляет около 0,00027 веса атома, в атоме урана около 0,00021. Иными словами, почти вся масса (почти весь вес) атома принадлежит его ядру. Атом похож на солнечную систему, состоящую из массивного солнца — ядра и легких планет — электронов.

Такова та картина внутреннего устройства атома, которая вытекала из взглядов Резерфорда, получивших свое более точное выражение в гипотезе ван-ден-Брука. Эта «ядерная» или «планетная» модель атома, сформулированная впервые Резерфордом, сыграла огромную роль в физике. Все последующее развитие физики, как мы увидим, блестяще ее подтвердило. Она и до сих пор считается наиболее правильным и глубоким представлением о внутреннем строении атома. И, вероятно, физики уже никогда не откажутся от нее и всегда будут продолжать считать ее правильной.

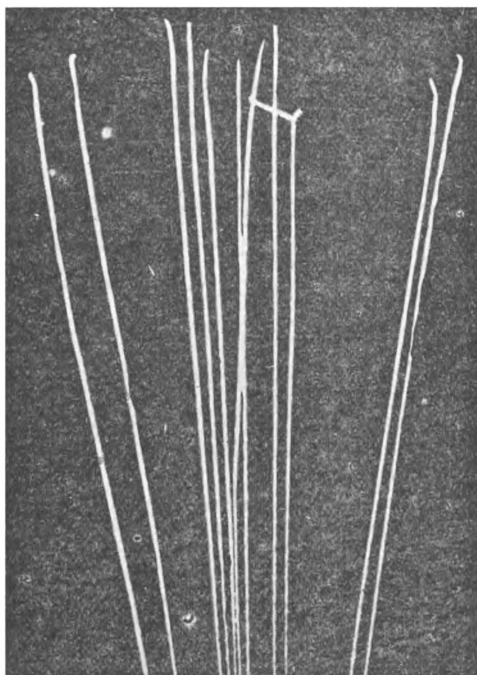


Взгляды Резерфорда на рассеяние альфа-частиц прекрасно подтвердились и при изучении путей альфа-частиц с помощью камеры Вильсона. В 1912 году Ч. Т. Р. Вильсон, работая со своей камерой, заснял путь альфа-частицы, изображенный на стр. 195. Альфа-частица двигалась в воздухе и поэтому могла сталкиваться лишь с атомами азота и кислорода (столкновение ее с атомами водорода, входящего в состав молекулы водяного пара, который всегда присутствует в камере Вильсона, тоже могло, разумеется, происходить, но на вильсоновских снимках оно имеет совершенно другой вид; см. ниже). На снимке видно, что она испытала два довольно резких поворота, во время каждого из которых она должна была находиться глубоко внутри столкнувшегося с ней атома. Особенно резок второй поворот (у конца пути частицы). Если внимательно взглядеться в место этого второго поворота, то виден небольшой выступ: этот выступ — это след пути того ядра азота или кислорода, которое столкнулось с альфа-частицей и при ударе тоже приобрело некоторую скорость. Таким образом, на конце заснятого пути имеется, строго говоря, «вилка»: путь альфа-частицы и путь ядра азота или кислорода.

Еще более ясную «вилку» можно различить на следующем снимке, где показан пучок альфа-частиц, выбрасываемых ториевым радиоактивным препаратом. На снимке видны (в увеличенном масштабе) последние три сантиметра пробега этих альфа-частиц. Заметные изменения направления («кники», как называют их физики, работающие с камерой Вильсона), видны на конце всех трэков («трэками» на том же профессиональном жаргоне называются пути частиц, сфотографированные в камере Вильсона), но на конце одного из них виден особенно резкий кник (отклонение достигает 70 градусов) и «вилочка». Более длинное острие вилочки — это путь альфа-частицы; более короткое — путь ядра азота, которое получило при столкновении с альфа-частицей достаточ-

ное количество энергии, чтобы пробежать в газе 0,6 мм, производя на этом пути ионы.

Ученик Резерфорда П. М. С. Блэккетт произвел массовое исследование путей альфа-частиц в камере Вильсона, которую



Последние три сантиметра пробега альфа-частиц тория  $C'$  (полный пробег частиц в воздухе в нормальных условиях 8,6 см).

он наполнял воздухом, аргоном, водородом, гелием, кислородом или почти чистым азотом. Он снял десятки тысяч фотографий.

Впоследствии мы еще будем много говорить о тех интересных вещах, которые он при этом открыл. Так как он про-

изводил стереоскопические снимки (применяя два фотографических аппарата с осями, расположенными перпендикулярно друг к другу), то он имел полную возможность, рассматривая оба снимка в стереоскоп, получить точное представление о пространственном расположении путей. Рассмотрим, например, его стереоскопический снимок, изображающий столкно-

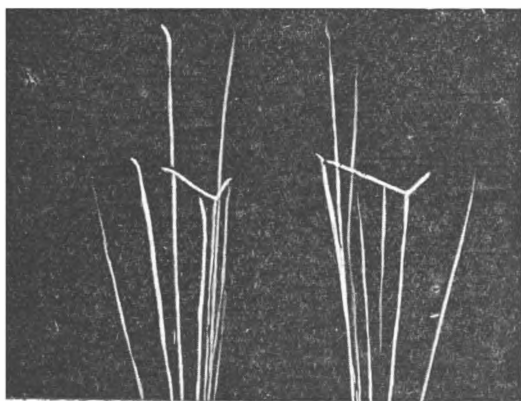


Столкновения альфа-частицы с атомом водорода (стереоскопическая пара снимков по Блэккетту).

вление альфа-частицы с ядром гелия. Курьезно в этом снимке то, что никак нельзя указать при взгляде на вилку, какая из двух частиц, бежавших по остриям вилки, была ударенной, а какая ударившей. Ведь ядро гелия, которое альфа-частица выбила из атома гелия при столкновении с ним, само ничем не отличается от альфа-частицы: оно есть, как мы уже знаем, такая же самая альфа-частица. А все альфа-частицы на свете похожи друг на друга больше, чем две капли воды. Если бы полагалось штрафовать частицу, которая произвела весь этот ералаш в камере Вильсона, «за нарушение правил движения», то было бы совершенно невозможно сказать, какая же из двух частиц должна быть оштрафована,



Столкновение альфа-частицы с атомом гелия  
(Блэккетт)



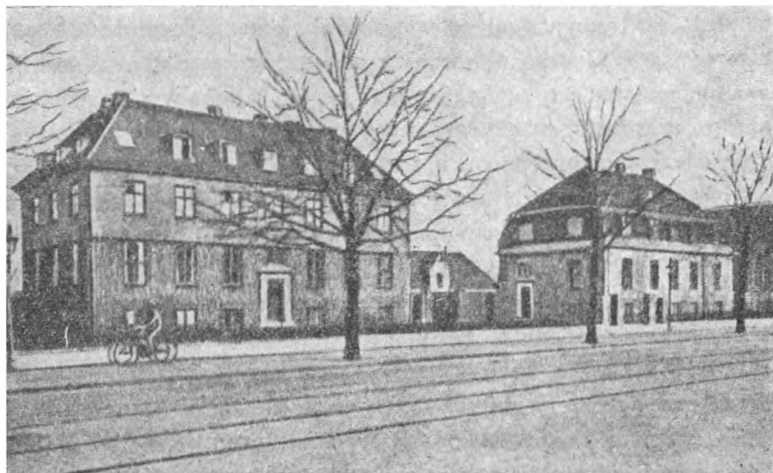
Столкновение альфа-частицы с атомом кисло-  
рода (Блэккетт).

Другое дело, когда альфа-частица сталкивается с ядром другого сорта, например с более тяжелым ядром (хотя бы азота или кислорода): в этом случае более короткое острие вилки принадлежит «пострадавшей» более массивной частице. (За-

метим вскользь, что стереоскопические снимки Блэккетт делал не зря: он хотел проверить, происходит ли столкновение атомных ядер в этих опытах по таким же самым законам механики, по каким, например, сталкиваются шары на бильярде, или же по каким-нибудь другим, более сложным. Оказалось, что по таким же самым. Для этого-то исследования Блэккетту хотелось промерить длину трёков, угол между остриями вилки и т. п. Всего этого нельзя сделать без стереоскопа).

Из опытов с рассеянием альфа-частиц вытекает, что атом состоит из двух резко отграниченных друг от друга частей. Одной из этих частей является ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. Другая часть — это электронная оболочка, — тонкое и нежное облачко электронов, обволакивающее со всех сторон ядро. Ядро атома является носителем его химической индивидуальности. Если от электронной оболочки оторвать один или несколько электронов, или если добавить к ней один или несколько электронов, то атом ещё не изменит своей химической природы: атом калия с оторванным одним электроном не становится от этого атомом другого химического элемента — он становится всего на всего ионом калия, таким же самым ионом, как тот, который играет роль в электролизе какой-нибудь соли калия. Химическая природа атома определяется не тем числом электронов, какое атом имеет в данную минуту, а тем числом, которое он имеет тогда, когда его полный заряд равен нулю. Иными словами, она определяется зарядом ядра, совпадающим, по ван-ден-Бруку, с порядковым номером места химического элемента в периодической таблице. Уже отсюда становится ясным, что радиоактивные превращения, при которых изменяется химическая природа элементов, сводятся к явлениям, происходящим с ядрами атомов. Ядро атома — это и есть та его часть, в которой клочут огромные силы, про-

являющиеся в радиоактивности; ядро является складом тех грандиозных количеств энергии, которые выделяются при радиоактивных превращениях и во много раз превосходят энергию обыкновенных химических реакций. Ядро атома как бы принадлежит к совершенно иному миру явлений, почти совершенно безразличному ко всему, что происходит вне его.



Здание копенгагенского Института теоретической физики, в котором работает Нильс Бор.

Всем этим в достаточной мере объясняется то, что в современной атомной физике изучение ядра и изучение электронной оболочки представляют две почти полностью отграниченные друг от друга области знания. В этой книжке мы интересуемся главным образом атомным ядром и явлениями, с ним происходящими. Но все же нужно рассказать немного и о тех основных результатах, которые были добыты при изучении электронной оболочки атома.

Основными успехами в этой области физика обязана гениальному датскому физiku Нильсу Бору. В 1913 году, будучи

еще совсем молодым человеком, Нильс Бор занялся теоретическим изучением «планетной модели атома» Резерфорда. Вопрос, который поставил себе Бор, может быть сформулирован следующим образом: по каким законам происходит движение электронов в электронной оболочке атома? Такие ли самые законы управляют движением электронов в оболочке атома, как те, которые управляют движением обыкновенных тел окружающего нас мира? Уже в течение нескольких сот лет физики прилагают законы механики к движению обыкновенных окружающих нас тел: к полету брошенного камня, к дрожанию струны, к качанию маятника, к вытеканию струи воды из отверстия в сосуде, к движению планет вокруг солнца. Но Нильс Бор доказал, что эти обыкновенные законы механики совершенно не применимы к движению электронов, совершающемуся в электронной оболочке атомов. К этому движению необходимо применять совершенно другие, совершенно особенные законы. Эти законы Бор искал, начиная с 1913 года и кончая 1927 годом, когда они, наконец, были окончательно найдены. (В окончательной формулировке этих законов большую роль сыграли, помимо работ самого Бора, исследования более молодых физиков — француза Луи де-Брогля и немцев Шредингера и Хайзенберга, из которых последний является учеником Бора). Здесь не место подробностям. Расскажем только об одном очень важном открытии, которое стало возможным благодаря этой теории.

Одним из наиболее существенных и важных результатов новой механики (к в а н т о в о й механики, как ее называют), применимой к движению электронов в оболочке атома, является объяснение периодического закона Менделеева. Это объяснение впервые дал Бор.

Оно основано на том факте, вытекающем из квантовой механики, что пространство вокруг атомного ядра не может быть заполнено электронами со сколь угодно большой плотностью. Перенаселение электронной оболочки электронами имеет пре-

дел. Этот предел таков: пространство вокруг ядра, обладающего данным зарядом, мысленно делится на концентрические слои, размеры которых определяются законами новой механики. В первом самом внутреннем слое не может находиться больше, чем 2 электрона, во втором не может быть больше 8 электронов, в третьем — не больше 18 электронов, в четвертом — не больше 32, в пятом — не больше 50 и т. д. Эти числа (2, 8, 18, 32, ...) — не случайный ряд чисел. Они образуются по определенному и очень простому закону. Вот этот закон: Возьмем ряд целых чисел:

$$1, 2, 3, 4, 5 \dots$$

Возведем все эти числа в квадрат. Мы получим ряд чисел:

$$1, 4, 9, 16, 25, \dots$$

Удвоим все эти квадраты. Тогда получатся числа

$$2, 8, 18, 32, 50, \dots,$$

т. е. как раз те же самые числа, которые стояли в написанном выше ряду.

Этот закон заполнения атома электронами определяет свойства периодической таблицы, если мы только добавим, что система, состоящая из 8, или 18, или 32, и т. д. электронов в слое, обладает большой устойчивостью и законченностью, даже если слой таков, что в нем могли бы помещаться еще электроны. Посмотрим же, как Бор объясняет периодическую таблицу Менделеева.

Будем переходить от более простых атомов к более сложным, каждый раз увеличивая число  $Z$  на единицу, т. е. прибавляя один элементарный заряд к положительному заряду ядра и подбрасывая еще один электрон в наружную оболочку атома. Первым идет водород ( $Z=1$ ), вторым — гелий ( $Z=2$ ). У гелия в электронной оболочке есть два электрона, т. е. как раз столько, сколько нужно, чтобы заполнить самый внутренний (первый) слой электронной оболочки. Итак ге-



лий закончил заполнение первого слоя оболочки. Прибавление дальнейших электронов может происходить только путем заполнения дальнейших слоев.

Поэтому у следующего — третьего — элемента (литий,  $Z=3$ ) три электрона распределяются так: два из них сидят в первом (внутреннем) слое, третий вынужден найти себе пристанище во втором слое. Если мы перейдем к четвертому элементу — бериллию ( $Z=4$ ), то во втором слое будет еще один электрон, у бора ( $Z=5$ ) там уже будет три электрона, у углерода ( $Z=6$ ) — четыре, у азота ( $Z=7$ ) — пять, у кислорода ( $Z=8$ ) — шесть, у фтора ( $Z=9$ ) — семь, у неона ( $Z=10$ ) — восемь. Если вспомнить, что второй слой не может содержать больше восьми электронов, то станет ясно, что с неоном окончилось заполнение второго слоя. Неон, как и гелий, окружен законченным слоем электронной оболочки, и этим объясняется их химическое сходство.

Если мы от неона ( $Z=10$ ) перейдем к натрию ( $Z=11$ ), то добавленный одиннадцатый электрон уже не сможет найти себе место ни в первом, ни во втором слое: оба эти слоя уже заполнены. Потому-то он будет вынужден усесться в третьем слое. Значит у натрия, как и у лития, в наружном слое имеется один электрон (только у лития этот наружный слой второй, а у натрия — третий). Вот почему натрий и литий так похожи друг на друга химически: они носят на себе почти одинаковую электронную одежду, их наружные слои совершенно одинаковы. От натрия, добавив еще один электрон, мы перейдем к магнию ( $Z=12$ ), у которого в наружном (третьем) слое окажется два электрона. Магний будет аналогичен бериллию, у которого, как мы видели, наружная одежда такая же самая. Затем пойдет алюминий ( $Z=13$ ) с тремя электронами в наружном слое, аналогичный бору; кремний ( $Z=14$ ) будет по этой же причине аналогичен углероду и т. д. и т. д., пока мы не дойдем до аргона ( $Z=18$ ), у которого будет в наружной оболочке столько же электронов (во-

семь), сколько у неона ( $Z=10$ ). Аргон поэтому должен быть похож на неон, должен быть, как и неон, благородным газом.

Можно было бы думать, что при переходе к следующему (19-му) элементу добавленный девятнадцатый электрон попадает в тот же самый третий слой. Ведь третий слой, как мы знаем, в состоянии воспринять 18 электронов, а не только те 8, которые разместились в этом слое у аргона. Однако комбинация из 8 электронов в одном слое, как мы говорили, всегда обладает некоторой относительной устойчивостью: ее лишь с трудом можно «испортить» добавлением нового электрона. Поэтому добавочный электрон, который нужно присоединить для перехода от  $Z=18$  к  $Z=19$ , попадает не в третий слой (хотя там еще есть места), а в четвертый. Так получается атом калия ( $Z=19$ ), 19 электронов которого распределяются следующим образом: десять ( $2+8$ ) заполняют первый и второй слой, в третьем находится крепкая компания восьми электронов, не желающая впускать к себе новых пришельцев, хотя в слое еще имеется десять ( $18-8$ ) свободных мест, а в четвертом слое сидит 19-й электрон. Легко понять, что калий должен быть химически весьма похож на натрий и на литий, так как их наружные слои электронной оболочки совершенно одинаковы. Если мы теперь перейдем к кальцию ( $Z=20$ ), то в четвертом слое будет уже два электрона, и это сделает кальций аналогичным магнию и бериллию. Возможно, что у скандия ( $Z=21$ ) целых три электрона соглашаются сидеть в четвертом слое, хотя под ними есть еще незаполненный третий, где расположились восемь электронов, не склонных впускать к себе новых жильцов. Но приходящие новые и новые электроны начинают уже слишком громко ворчать на это, и в конце концов им удастся сломить сопротивление восьми обитателей третьего этажа. Третий этаж начинает заполняться, и это продолжается до тех пор, пока не получится атом, у которого все три внутренних слоя ( $2+8+18$ ) заполнены

электронами, а в четвертом слое сидит еще один. Этот атом, у которого очевидно  $Z = 29$ , есть атом меди. Он обнаруживает некоторое сходство с калием и с натрием, так как и у калия, и у натрия, и у меди наружный слой содержит в себе только один электрон. Но все же сходство не такое большое, как у натрия и калия между собою: ведь натрий и калий напоминают друг друга не только одним, но даже двумя наружными слоями электронов. (Образно говоря, у меди и у калия только пальто одинаковые, а калий и натрий носят не только одинаковые пальто, но и под пальто одинаковые костюмы).

Прибавляя дальнейшие электроны (причем, разумеется каждый раз с прибавлением электрона мы должны на единицу увеличивать и число элементарных зарядов, содержащихся в положительном заряде ядра), мы получим цинк ( $Z = 30$ ) с двумя электронами в четвертом слое, галлий ( $Z = 31$ ) с тремя и т. д., пока не получим криптон ( $Z = 36$ ), у которого в четвертом слое имеется восемь электронов. Криптон по наружной своей электронной одежде совершенно напоминает аргон и неон. Он тоже должен быть благородным газом. (Все эти соображения настолько хорошо подтверждаются химическими фактами, что когда мы говорим, что криптон, например, должен быть благородным газом, то тем самым мы без дальнейших слов подразумеваем, что он и есть благородный газ).

Восемь электронов в наружном (четвертом) слое криптона ведут себя так же, как вели себя восемь электронов в наружном (третьем) слое аргона: они тоже не пускают к себе новых жильцов. Они имеют даже меньше оснований для такого самоуправства: ведь в третьем слое оставалось десять ( $18 - 8$ ) свободных мест, а в четвертом слое их даже двадцать четыре ( $32 - 8$ ). Но как бы то ни было, восемь электронов, расположившихся в четвертом слое оболочки криптона, способны настоять на своем: при переходе к следующему элементу добавляемому электрону приходится поме-

ститься в пятом слое. Так получается рубидий ( $Z=37$ ), который, как легко понять, должен быть по химическим свойствам вполне похож на литий, натрий, калий. За ним идет стронций ( $Z=38$ ), похожий на бериллий, магний, кальций и т. д., но здесь, как и в предыдущей аналогичной истории пришельцы начинают негодовать, и их в конце концов пускают в четвертый слой. Начинается заполнение четвертого слоя. Но оно происходит не до конца. Как только число электронов в нем доходит до 18 (следующая, после 8, устойчивая комбинация), то эти восемнадцать электронов, обнаглев, перестают впускать к себе новых соседей, хотя остается еще в их этаже четырнадцать ( $32-18$ ) свободных мест. Таким образом получается атом, у которого три первых слоя вполне заполнены электронами ( $2+8+18$ ), четвертый заполнен частично (18 электронов), а в пятом находится один электрон. Этот атом ( $Z=47$ ) называется атомом серебра. По своей электронной одежде он должен близко походить на медь.

Дальнейшее прибавление электрона (разумеется при соответствующем повышении и заряда ядра) дает кадмий ( $Z=48$ ), который должен быть похож на цинк, и т. д., пока не получится ксенон ( $Z=54$ ) с восемью электронами в том же пятом слое. Ксенон во всем похож на криптон, т. е. должен быть благородным газом.

Его наружные электроны ведут себя, как обычно, т. е. не впускают к себе новых жильцов. У следующего атома ( $Z=55$ ) добавленный электрон находит себе убежище в шестом этаже. Это — атом цезия, который, разумеется, химически похож на литий, натрий, калий, рубидий: в его наружном слое есть один электрон. Но под этим наружным слоем есть целых два незаполненных этажа: пятый, в котором всего восемь электронов, а может поместиться 50, и четвертый, в котором 18 электронов, а может поместиться 32. У бария ( $Z=56$ ) два электрона еще соглашаются жить на ше-

стом этаже при таком обилии незаполненных квартир внизу. Но дальше так продолжаться не может. Лантан ( $Z=57$ ) похож на иттрий ( $Z=39$ ): четвертый этаж еще продолжает содержать только свои 18 электронов. Но дальнейшие электроны начинают сваливаться в четвертый этаж. Там ведь есть еще четырнадцать свободных мест! Дальнейшее заполнение пятого слоя не будет продолжаться, пока не будет полностью закончено заселение четвертого. При этом заселении меняются только сравнительно глубокие слои (четвертый этаж ведь отделен одним этажом от верхнего — шестого), а потому химические свойства всех элементов, которые получают при этом, не должны отличаться от свойств лантана, т. е. все эти элементы должны походить на иттрий. Так возникает длинный ряд похожих друг на друга элементов, хорошо известных химикам под названием «редких земель». У всех этих элементов оба наружных слоя электронной оболочки (пятый и шестой) такие же, как у лантана. Их сходство с лантаном и между собою чрезвычайно велико — еще больше чем, например, сходство натрия с калием, у которых хотя внешние слои одинаковы, но зато число этажей у всей постройки разное (у натрия самый верхний этаж — третий, у калия четвертый). Нет ничего удивительного в том, что в XIX столетии химики с таким трудом научились отличать различные редкоземельные элементы друг от друга. Число редкоземельных элементов совершенно однозначно определяется теорией Бора: между лантаном ( $Z=57$ ), похожим по химическим свойствам на иттрий ( $Z=39$ ), и следующим элементом, похожим на циркон ( $Z=40$ ), должно вклиниваться ровно четырнадцать редкоземельных элементов: столько, сколько незаполненных мест оставалось в четвертом слое ( $32 - 18 = 14$ ). Поэтому элемент иттербий ( $Z=57 + 14 = 71$ ) должен быть последним редкоземельным элементом: семьдесят второй элемент уже не может, как утверждает теория, быть редкоземельным; он должен по своим хи-

мическим свойствам быть во всем похожим на циркон. Это утверждение теории Бора приобрело особенный интерес потому, что в то время, когда Бор разрабатывал эти идеи, элемент № 72 еще не был открыт химиками. Поэтому представился случай подвергнуть теорию Бора серьезному испытанию. Дело происходило следующим образом.

Известно, что похожие друг на друга в химическом отношении элементы всегда имеют тенденцию встречаться в природе вместе. В этом нет ничего удивительного: если два химических элемента очень похожи друг на друга, т. е. участвуют в одинаковых химических реакциях, одинаково охотно соединяются с одним и тем же веществом и т. д., то все, что будет происходить с одним из этих элементов, будет происходить и с другим, а поэтому отделить их друг от друга очень трудно. (Вспомним, например, с какими мучениями Пьер и Мария Кюри выделили соединения радия из соединений бария, очень близкого к радю по химическим свойствам). Поэтому там, где встречается какой-нибудь химический элемент всегда можно обнаружить, хотя бы и в незначительном количестве другие элементы, похожие на него по химическим свойствам.

Элемент № 72, — так рассуждал Нильс Бор, — должен по своим свойствам походить на циркон. Вероятно № 72 — это очень редкий в природе элемент: иначе химики его давно сумели бы обнаружить. Но если уже где-нибудь его искать, то прежде всего, конечно, нужно обыскивать не те минералы, в которых есть редкие земли, а те, в которых содержится циркон.

По указаниям Бора физик Костер и химик Хевеши раздобыли минералы со значительным содержанием циркона и стали искать в них элемент № 72. Количество этого элемента в исследованных минералах оказалось настолько ничтожным, что он мог быть открыт не посредством химического анализа (химический анализ, при всей своей чувствительности, все же для

этого недостаточен), а с помощью совершенно других способов анализа — анализа рентгеновскими лучами. Костер и Хевеши поместили циркон, добытый из этих минералов, на антикатод рентгеновской трубки и, применяя рентгеновский спектрометр Брэггов, рассмотрели характеристические рентгеновские линии. Оказалось, что наряду с характеристическими линиями циркона в спектре есть и менее резкие линии, принадлежащие какому-то другому элементу. Вспомним открытие Мозли: по характеристическим рентгеновским линиям химического элемента можно определить порядковый номер этого элемента в периодической таблице (число  $Z$ ). Характеристические линии, которые увидели Костер и Хевеши и которые должны были принадлежать какому-то химическому элементу, подмешанному к циркону, были по своей длине волны чем-то промежуточным между характеристическими линиями иттербия ( $Z=71$ ) и тантала ( $Z=73$ ). Значит они принадлежали элементу № 72!

Таким образом было доказано, что элемент № 72 действительно, как и предсказал Нильс Бор, сопутствует в природе циркону, а не редким землям. Значит сам он не редкоземельный элемент, а элемент, похожий на циркон. Предсказание Бора блестяще оправдалось.

Новый элемент, которого тогда еще никто не видел в чистом виде и о существовании которого Костер и Хевеши заключили только по его рентгеновским спектральным линиям, получил название гафний. Это название было ему дано в честь города Копенгаген, в котором уже много лет живет Нильс Бор (Гафния — это название Копенгагена по-латыни).

Теперь будем продолжать рассказ о периодической таблице элементов. Элемент № 72 — гафний, который заставил нас так отвлечься в сторону и рассказать историю его открытия, обладает наружными слоями, вполне похожими на наружные слои циркона. Его четвертый этаж совершенно заполнен, и должно продолжаться заполнение пятого. Но это

заселение пятого этажа, как бывало и прежде в подобных случаях, должно приостановиться тогда, когда будет достигнута промежуточная стадия заполнения — восемнадцать электронов, образующих довольно устойчивую комбинацию. Поэтому здесь мы получим в конце концов элемент, у которого четыре внутренних слоя электронной оболочки атома заполнены  $2 + 8 + 18 + 32 = 60$  электронами, в пятом слое есть 18 электронов, а в шестом — один. Этот химический элемент должен быть по химическим свойствам похож на серебро и медь, от которых он ничем не отличается по устройству своих внешних слоев. Этот элемент — золото. Его порядковый номер, как не трудно сосчитать, должен быть семьдесят девять ( $79 = 2 + 8 + 18 + 32 + 18 + 1$ ). Вслед за золотом идут и другие элементы, у которых продолжается заселение шестого этажа, пока, наконец, мы не дойдем до радона (эманации радия,  $Z = 86$ ) с восемью электронами в шестом этаже. По химическим свойствам этот элемент должен быть, как и криптон и ксенон, благородным газом. Это, как мы знаем, и обнаружил в свое время Вильям Рэмзэй, изучая химические свойства эманации.

Элемент № 87 должен иметь один электрон в седьмом этаже (и 2, 8, 18, 32, 18, 8 электронов соответственно в первом, втором, третьем, четвертом, пятом, шестом этажах). Поэтому он будет по своим химическим свойствам во всем походить на цезий. Несомненно это так и есть, но это еще не проверено на опыте (американский химик Эллисон недавно объявил, что он открыл элемент № 87, и назвал этот элемент виргинием, в честь американского штата Виргиния; под этим названием элемент № 87 и фигурирует в нашем списке, но так как Эллисон еще не предъявил достаточно убедительных доказательств того, что элемент № 87 им действительно открыт, то мы поместили это название в скобки, чтобы подчеркнуть сомнительный характер открытия; по таким же причинам поставлено в скобки и название элемента № 85 — алаба-



мий, в честь штата Алабама — открытие которого было объявлено тем же Эллисоном).

Элемент № 88 имеет два электрона в седьмом этаже электронной оболочки атома и поэтому должен быть похож по химическим свойствам на барий. Элемент № 88 — это наш старый знакомец, радий.

Вслед за радием идут элементы, у которых продолжается заселение верхних оболочек. Электроны спускаются в шестой этаж, где так много свободных мест, и в незаполненный пятый. Если бы мы знали еще много следующих за радием элементов, то мы без сомнения обнаружили бы в дальнейшем очень сложные отношения: мы обнаружили бы группу элементов, напоминающую группу редких земель и соответствующую дальнейшей стадии заполнения пятого этажа (в нем остается 14 свободных мест до предварительного заполнения 32 электронами), а также еще более обширную группу, соответствующую окончательному заполнению того же пятого этажа (ведь в нем не 32 места, а 50, согласно указанному выше основному правилу, определяющему устройство периодической таблицы Менделеева). К несчастью, химики лишены возможности изучать эти, вероятно очень интересные, химические элементы; периодическая таблица неожиданно обрывается, как книга, у которой вырваны последние страницы. Элемент №92 (уран) — это последний элемент периодической таблицы, элемент с самым большим числом  $Z$  (зарядом ядра) из всех найденных в природе элементов. Элемент № 93 никем еще не был найден в природе (об элементах, следующих за ураном, будет кое-что сказано в главе IX).

Объяснение периодической системы элементов, открытой Менделеевым, является одним из важнейших следствий новой механики — «квантовой механики», объясняющей атомные явления. Мы уже говорили (во второй главе) о том, что Менделеев, автор периодического закона, не понимал, да и не мог понимать, в чем заключается настоящий физический

смысл открытых им закономерностей. Объяснение периодического закона, расшифровка его с точки зрения ядерной и электронной модели атома, — это заслуга Нильса Бора. Так сумел этот замечательный ученый разгадать труднейшую загадку, которую девятнадцатый век оставил в наследство двадцатому, — загадку периодической системы элементов.

## Глава шестая

### ИЗОТОПЫ

В четвертой главе мы узнали, что представляют собою открытые Беккерелем явления радиоактивности: явления радиоактивности, как мы увидели из этой главы, состоят в превращении одних химических элементов в другие. Именно это превращение и сопровождается выделением тех лучей Беккереля, которые были открыты благодаря своему действию на фотографическую пластинку. Теперь, когда мы знаем, каково внутреннее устройство атома, мы можем дать более подробный ответ на вопрос, как же именно происходят эти превращения атомов одного химического элемента в атомы другого химического элемента. Мы знаем, например, что радиоактивное превращение сопровождается испусканием альфа-частиц. Откуда же может появиться альфа-частица, испускаемая радиоактивным атомом? Альфа-частица — это тяжелая частица, тоже являющаяся ядром атома — атома гелия. В электронной оболочке атома даже и материалов таких нет, из которых может быть построена альфа-частица. Понятно, что альфа-частица вырывается не из электронной оболочки атома, а из атомного ядра.

Что же произойдет с атомом, из ядра которого вылетает альфа-частица? Прежде всего ясно, что атом станет легче. Ведь вес альфа-частицы равен четырем (в употребительных единицах атомного веса, в которых единицей является приблизительно вес атома водорода), значит атомный вес атома

должен уменьшиться на 4 единицы. Но должно произойти не только это: альфа-частица, как мы знаем, несет на себе два положительных элементарных заряда. Значит именно на эти два положительных элементарных заряда и должен уменьшиться полный заряд ядра, из которого вылетает альфа-частица. Иными словами число  $Z$ , определяющее собой порядковый номер места элемента в периодической таблице, должно уменьшиться на 2.

Таким образом мы получаем правило, которое было впервые сформулировано Содди.

Испускание альфа-частицы вызывает уменьшение атомного веса радиоактивного химического элемента на 4 единицы и в то же время перемещает его на два места ближе к началу таблицы элементов.

Примером на это правило может служить превращение радия в радон. Атомный вес радона, как мы уже знаем, действительно меньше атомного веса радия на 4. Вместе с этим радон есть благородный газ, подобный аргону, а радий — металл, подобный кальцию. Радон должен стоять на 2 места ближе к началу таблицы элементов, чем радий, подобно тому, как аргон на 2 места ближе к началу, чем кальций. Если бы идея ван-ден-Брука была известна раньше, то на основании заряда альфа-частицы можно было бы предсказать заранее, каковы будут химические свойства эманации радия.

Но радиоактивные элементы, как мы знаем, испускают не только альфа-лучи. Они испускают также бета и гамма-лучи. Каков же смысл испускания этих лучей?

Что касается гамма-лучей, то для того, кто интересуется превращением одних химических элементов в другие, гамма-лучи не представляют особенно большого интереса. Гамма-лучи не несут на себе никакого электрического заряда и не отклоняются в электрическом и магнитном поле. Исследование этих лучей убедило физиков в том, что они по своей физиче-

ской природе ничем не отличаются от лучей Рентгена, разве лишь тем, что длина волны у них еще меньше, а жесткость (способность проходить через непрозрачные для видимого света тела) еще больше, чем у рентгеновских лучей. Гамма-лучи, как и рентгеновские лучи, как и лучи видимого света, представляют собой поток электромагнитных волн, бегущих во все стороны от атома. Гамма-лучи представляют собой, если можно так выразиться, «всплеск в эфире»<sup>1</sup>, распространяющийся от того места, где произошло сильное электромагнитное возмущение. Нет ничего удивительного в том, что очень сильный «всплеск в эфире» происходит при такой атомной катастрофе, как внезапный взрыв ядра, сопровождающийся выбрасыванием какой-нибудь заряженной частицы.

Но иное дело — бета-лучи. Бета-лучи ведь это поток электронов, поток материальных частиц, вырывающихся при радиоактивных превращениях. Откуда берутся эти электроны? О них уже нельзя сказать, как об альфа-частицах, что в электронной оболочке атома нет материалов, из которых они могли бы образоваться. Ведь электронная оболочка сама состоит из таких же самых электронов. Поэтому бета-лучи могли бы состоять из электронов, которые отрываются от наружной электронной оболочки атома. В настоящее время известно, что часть бета-лучей действительно такого происхождения. (Бета-лучи, которые испускает чистый радий,

---

<sup>1</sup> Что такое эфир — знает (или думает, что знает) каждый радиолобитель. Эфир — это та невидимая среда, в которую погружены все тела и которая заполняет даже промежутки между их атомами. Так думали физики в XIX столетии. Световые и другие электромагнитные волны они объясняли тем, что эти волны распространяются в толще эфира, как от брошенного в воду камня бегут волны по поверхности воды. Но некоторое время (лет тридцать) тому назад физики обнаружили, что на самом деле эфира нет. Эфир был ошибочной гипотезой. Поэтому теперь слово эфир сохранилось в физике только как удобное образное выражение. (Говорят же, например, что солнце восходит и поднимается по небесному своду, хотя и небесный свод только кажущийся, и движется не солнце, а земля. Таким же образом можно говорить о радиоволнах, как о «волнах в эфире», или называть «свиньей в эфире» недисциплинированного радиолобителя).

освобожденный от всех обычно к нему примешанных продуктов его распада, состоят только из электронов, выбрасываемых электронной оболочкой атома радия). Но все же можно предположить, — и дальнейшее исследование целиком это оправдывает, — что часть (и даже большая часть) бета-лучей имеет совершенно иное происхождение. Это электроны, выбрасываемые не электронной оболочкой, а атомным ядром.

Что произойдет с радиоактивным атомом, если из его ядра внезапно вырвется и улетит электрон? Вес этого ядра (а значит и вес всего атома) при этом существенно не изменится: ведь электрон весит так мало, что его весом, по сравнению с весом даже самого легкого атома, можно совершенно пренебречь. Итак, атомный вес атома, ядро которого испустило электрон (бета-частицу), не изменится. Но другое важное изменение все же произойдет. Электрон несет на себе, как мы знаем, один отрицательный элементарный заряд. Этот заряд отнимается у ядра. Но ведь отнять одну отрицательную единицу — это все равно, что прибавить одну положительную. Значит заряд ядра, из которого вылетела бета-частица, увеличится на один положительный элементарный заряд (число  $Z$  возрастет на одну единицу). Так мы приходим ко второму важному правилу, которое было впервые (в 1913 году) сформулировано Фредериком Содди и одновременно, совершенно независимо от Содди, немецким химиком Казимиром Фаянсом:

При испускании бета-частицы атомный вес радиоактивного химического элемента не изменяется. В то же самое время этот элемент превращается в другой химический элемент, расположенный на одно место дальше от начала периодической таблицы элементов.

Эти два важных правила («правила сдвига» Фаянса и Содди) определяют собою два типа радиоактивных превращений:

альфа-превращения и бета-превращения. Правила сдвига, как мы видим, совершенно необходимы для того, чтобы разобратся в путанице родословного дерева радиоактивных элементов.

Из правил сдвига вытекает важное следствие, на которое указал Содди. Предположим, что какой-нибудь радиоактивный атом сперва испустил альфа-частицу, а затем — одну за другой — две бета-частицы. Что с ним произойдет в результате этих последовательных превращений?

Атомный вес его при первом превращении уменьшился на 4 единицы, при двух других — остался без изменения. Значит в результате атомный вес будет на 4 единицы меньше, чем был раньше. Что касается до места элемента в периодической таблице, то сперва (при альфа-превращении) он передвинется на два места к началу таблицы, а затем (в результате двух бета-превращений) он будет два раза переходить на одно место подальше от начала, т. е., в конце концов, вернется на свое первоначальное место. Следовательно в результате одного альфа-превращения и двух бета-превращений вновь восстанавливается прежний заряд ядра, прежний порядковый номер химического элемента в периодической системе. Следовательно тот атом, который получился в результате этих трех последовательных превращений, по своим химическим свойствам не должен отличаться от первоначального атома, несмотря на то, что его атомный вес уменьшился на 4 единицы.

Из всех этих рассуждений видно, что могут существовать два атома, которые по своим химическим свойствам даже ближе друг к другу, чем атомы двух аналогичных друг другу химических элементов (например, натрия и калия). Такие два атома, отличающиеся друг от друга атомным весом, но имеющие один и тот же заряд ядра, мы поэтому будем считать атомами различных разновидностей одного и того же химического элемента. Такие разновидности одного и того же химического элемента принято называть «изотопами» этого

химического элемента (слово изотоп происходит с греческого. Оно должно подчеркивать, что все разновидности одного и того же элемента, несмотря на отличие в атомном весе, занимают одно и то же место в периодической таблице: «исос» по гречески значит одинаковый, «топос» — место. Название это предложил Содди).

Два изотопа одного и того же химического элемента должны быть весьма близки друг ко другу по всем свойствам (химическим, оптическим и иным). Это связано с тем обстоятельством, которое мы подчеркивали уже выше, что заряд атомного ядра играет гораздо бóльшую роль в определении свойств атома, чем вес этого ядра. Изотопы должны быть поэтому почти неотличимы друг от друга (за исключением лишь того случая, когда один из них радиоактивен и распадается, испуская лучи Беккереля, а другой нет. Тогда лучи Беккереля служат признаком, по которому можно отличить один изотоп от другого. То же самое относится и к тому случаю, когда оба изотопа радиоактивны, но испускают разные лучи Беккереля, например, альфа-лучи с различной скоростью альфа-частиц). По этой же причине должно быть очень трудно вновь отделить друг от друга два изотопа, если они смешались. Необходимо заметить, впрочем, что различие между свойствами двух изотопов одного и того же химического элемента может быть и не очень маленьким, если только различие в атомном весе у них очень уже велико. В последнее время в физической литературе иногда можно встретить примеры весьма схоластических споров о том, при какой степени отличия двух разновидностей одного и того же химического элемента можно уже перестать считать их двумя разновидностями и начать считать их двумя разными химическими элементами. Ясно, что это вопрос чисто словесного удобства. Удобнее всего поступить так: считать единственно характерным для понятия «данный химический элемент» заряд ядра, т. е. число  $Z$ . Атомные ядра с одинаковым  $Z$ , но с разными



другими свойствами (как бы сильно эти свойства ни отличались), считать ядрами одного и того же химического элемента. (Заметим, что иногда, из соображений чисто практического удобства, различные разновидности одного и того же химического элемента обозначаются разными, а не теми же самыми символами).

Пользуясь «правилами сдвига» Фаянса-Содди и понятием изотопов, можно разобраться в радиоактивных превращениях детально. Рассмотрим, например, ряд радиоактивных превращений, которые происходят с атомом радия. Мы уже знаем, что первым таким превращением является превращение атома радия в атом радона. При этом испускается альфа-частица, и в согласии с правилами Фаянса-Содди атом радия ( $Z=88$ ) превращается в атом радона ( $Z=86$ ) с атомным весом 222. Продолжительность жизни радия равна, как мы знаем, приблизительно 1 600 годам. Атом радона оказывается менее долговечным: если запаять радон в тонкостенную стеклянную трубочку и измерить количество испускаемых альфа-частиц, а затем через 3,825 дня перевести этот радон в другую трубочку (смысл этой предосторожности будет понятен из дальнейшего) и снова измерить количество альфа-частиц, то окажется, что оно уменьшилось вдвое. Значит, 3,825 дня — это и есть продолжительность жизни радона. Какова же дальнейшая судьба атома радона? На это дает ответ следующий опыт: если внести в радон какое-нибудь металлическое острие и некоторое время поддержать его там, то затем это острие, вынутое из радона, само оказывается радиоактивным. Причина этого явления очевидно заключается в том, что атомы радона, распадаясь, превращаются в атомы какого-то твердого тела, причем эти атомы оседают на стенках сосуда, содержащего радон и на любом внесенном в этот сосуд теле. Получается «активный осадок», который, впрочем, в обыкновенных опытах совершенно невидим, потому что количества эманации,

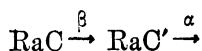
имеющиеся в распоряжении экспериментатора, всегда бывают очень малы. Тем не менее этот невидимый и почти неведомый осадок очень легко обнаружить по испускаемым лучам Беккереля. Изучая эти лучи Беккереля, физики обнаружили, что активный осадок имеет не простой характер: он состоит из атомов разных химических элементов. Это было обнаружено следующим образом: всякий радиоактивный химический элемент распадается так, что его количество убывает, как принято говорить, «в геометрической прогрессии». Что это значит? Это значит, что от заданного наличного количества атомов этого радиоактивного элемента в течение некоторого определенного промежутка времени остается половина. Проходит еще такой же самый промежуток времени и остается только половина от этой половины. Еще через такой же промежуток времени остается половина от половины от половины, и т. д. (Именно этот промежуток времени мы и назвали условно продолжительностью жизни радиоактивного элемента). Изучая же, каким образом спадает со временем активность невидимого осадка, выделяющегося из радона, физики нашли, что активность этого осадка спадает по другому, гораздо более сложному, закону. Но оказалось, что этот сложный закон спадания активности осадка может быть объяснен тем, что вся радиоактивность осадка является суммой нескольких радиоактивностей, из которых каждая спадает по простому закону «геометрической прогрессии», но только у каждой своя особая продолжительность жизни. Ясно, что каждая из этих активностей, дающих в сумме радиоактивность всего осадка, относится к особым радиоактивным химическим элементам, смесь которых образует этот осадок. Действуя на осадок различными химическими реактивами, можно установить, какова химическая природа различных составных частей осадка. Таким образом Резерфорд, Содди и другие исследователи смогли восстановить всю историю атома радия в его последовательных превращениях.

Оказалось, что атом радона ( $Z=86$ , атомный вес 222) испуская альфа-частицу, превращается, как того и требуют правила сдвига, в атом элемента, у которого  $Z=84$ , а атомный вес, очевидно, 218. Этот элемент получил название «радий А» (обозначение  $RaA$ ). Он имеет очень маленькую продолжительность жизни — всего 3,05 минуты (т. е. в течение этого промежутка от первоначального количества атомов  $RaA$  остается половина). Радий А тоже испускает альфа-частицу и превращается в элемент, названный радием В ( $Z=82$ , атомный вес, по правилам сдвига, должен быть равен 214). Атом радия В испускает уже не альфа, а бета-частицу. Продолжительность жизни радия В равна 26,8 минутам. Так как у радия В порядковый номер  $Z$  равен 82, то он, следовательно, является изотопом свинца (ведь у свинца, как видно из нашего списка элементов,  $Z=82$ ). Испустив свою бета-частицу, радий В должен превратиться в элемент с таким же атомным весом 214, но с номером  $Z=83$ , т. е. в изотоп висмута (у висмута, как видно из нашего списка, такой же номер, но значительно меньший атомный вес). Этот изотоп висмута, получивший название радия С, ведет себя гораздо более сложным образом. Он испускает и альфа- и бета-лучи вместе. А именно, из 10 000 атомов радия С 9996 испытывают бета-превращение, т. е. их ядра выбрасывают из себя бета-частицы (электроны). Остальные 4 атома из 10 000 выбрасывают альфа-частицу. Продолжительность жизни радия С составляет 19,7 минут.

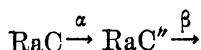
Таким образом в этом месте прямое родословное дерево радия разветвляется. У радия С оказывается не один, а два непосредственных продукта распада. Один из них (тот, который получается в результате бета-распада) получил название радия С'. Его атомный вес должен быть также 214, как у радия В и у радия С, но порядковый его номер есть  $Z=84$ . Он является, следовательно, изотопом радия А. Радий С обладает рекордно малой продолжительностью жизни: она

равна всего лишь одной миллионной доле секунды (из всех радиоактивных элементов его побивает в этом отношении только один, а именно так называемый торий С', один из дальнейших продуктов распада тория, у которого она равна одной стомиллиардной доле секунды. Было бы очень длинно рассказывать о том, как физики умудрились измерить столь ничтожные промежутки времени). Радий С' испускает весьма быстрые альфа-частицы, превращаясь в радий D, у которого, по правилам сдвига  $Z=82$ , а атомный вес — 210.

Вторым сыном радия С является радий С'', который получается из атомов радия С, испустивших альфа-частицу. У радия С'' по правилам сдвига должен быть атомный вес равный 210 и  $Z=81$ . Он — изотоп таллия. Продолжительность его жизни 1,32 минуты, и он испускает бета-частицу. Что может получиться в результате? Ясно, что тот же самый радий D, который получился от радия С'. Ведь все равно в каком порядке выдернуть из ядра радия С альфа- и бета-частицу. Превращение



должно вести к тому же результату, что и превращение



(греческие буквы  $\alpha$  (альфа) и  $\beta$  (бета), стоящие над стрелками обозначают характер радиоактивного превращения).

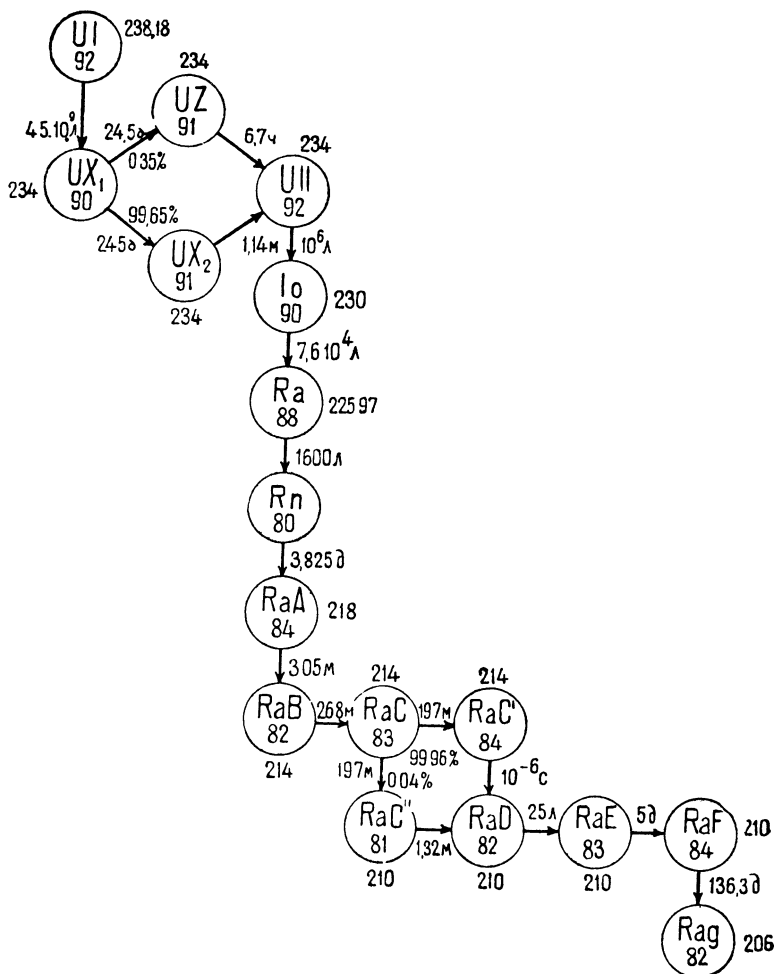
Поэтому разветвление родословного дерева радия снова сомкнулось. Изотоп свинца радий D ( $Z=82$ , атомный вес — 210) имеет продолжительность жизни равную около 25 лет. Испуская бета-частицу, он превращается в радий E (изотоп висмута,  $Z=83$ , продолжительность жизни 5 дней), а тот, снова испуская бета-частицу, превращается в радий F ( $Z=84$ ). Радий F, элемент с атомным весом 210, является изотопом уже известных нам элементов RaA и RaC'.

Радий F — это не что иное, как полоний, который, как мы узнали из первой главы, Мария Кюри нашла в урановой смоляной руде еще до открытия радия. Полное тождество радия F с полонием видно из того, что их активность убывает по совершенно одинаковому закону: продолжительность жизни равна 202 дня. Радий F испускает альфа-частицу и при этом превращается, как явствует из правил сдвига, в элемент с атомным весом 206 и с порядковым номером  $Z=82$ . Этот элемент назван радием G. Он является изотопом свинца.

До сих пор не найдено никаких указаний на дальнейший распад радия G. Повидимому он уже не радиоактивен, т. е. является конечным продуктом длинного ряда превращений. Это заключение подтверждается тем обстоятельством, что во всех минералах, содержащих уран и следовательно и его продукты распада (в том числе и радий), всегда находят свинец. При этом, в отличие от радиоактивных продуктов распада урана, которые, как мы видели, всегда должны находиться в определенной пропорции по отношению к урану, определяемой радиоактивным равновесием (например, как мы рассчитали, грамм радия на три тонны урана), — количество свинца бывает в таких минералах весьма разнообразное. Ясно, что если свинец является конечным продуктом распада урана и радия, то процентное содержание свинца в урановом минерале должно все время увеличиваться. Чем больше свинца приходится на данное количество урана, тем древнее минерал. Так как кроме свинца конечным продуктом распада является также и гелий (альфа-частицы!), то тоже самое применимо также и к количеству гелия в минералах, содержащих уран. Количество свинца в таком минерале, так же как и количество гелия в нем, позволяет рассчитать возраст минерала, причем цифры, вычисленные на основании содержания гелия в минерале, обыкновенно прекрасно совпадают с цифрами, вычисленными на основании содержания свинца. Это обстоятельство подтверждает мысль о том, что изотоп свинца ра-

дия G есть конечный продукт распада, уже не распадающийся дальше, а вместе с тем дает новый способ определения возраста минералов в земной коре — способ, которым геологи пользуются наряду со способом плеохроических венчиков для определения хронологии отдаленных геологических эпох. А если прибавить к тому же еще и тот факт, что определенный химиками атомный вес свинца, добытого из урановых минералов, оказался не 207, как обычно бывает у свинца, а 206,05 (т. е. то же, что дает для радия G правило сдвига), — то все сомнения исчезают, и мы должны признать, что именно свинец (точнее говоря, изотоп свинца — радий G) является последним отпрыском благородной династии радиоактивных элементов.

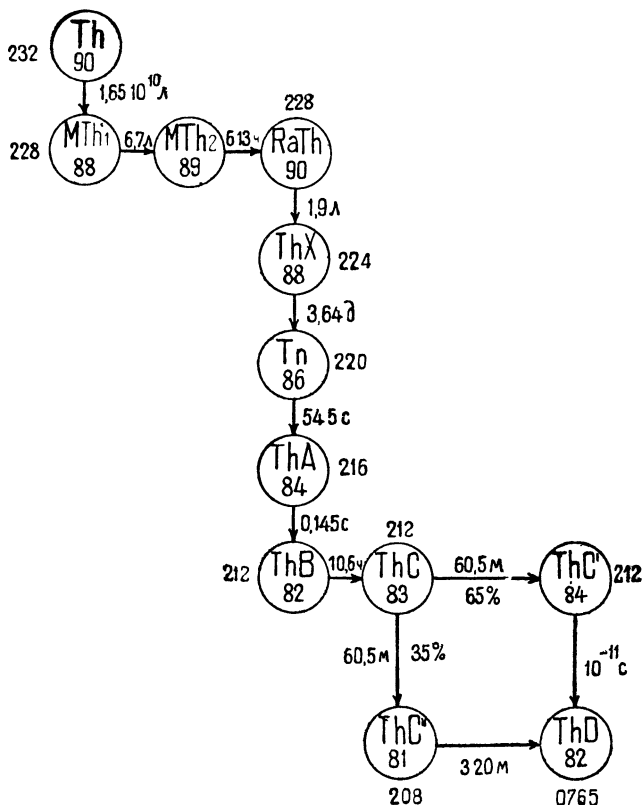
Мы подробно рассмотрели один лишь отрезок родословного дерева потомков урана. Для более подробного ознакомления с радиоактивными элементами приведем таблицы, характеризующие распад трех известных династий радиоактивных элементов. Так как при альфа-распаде атомный вес или уменьшается на 4 единицы или вовсе не меняется при бета-распаде, то атомные веса всех элементов одной и той же радиоактивной династии дают при делении на 4 один и тот же остаток. По причинам, которые станут ясны дальше, атомные веса всех радиоактивных элементов являются приблизительно целыми числами; поэтому мы могли бы ожидать, что будут существовать четыре династии радиоактивных элементов, отличающиеся тем, что у одной из них атомные веса выражаются числами, имеющими вид  $4n$ , где  $n$  — целое число (т. е. делятся без остатка на 4), у другой — числами вида  $4n + 1$  (дают остаток 1), у третьей —  $4n + 2$  и у четвертой —  $4n + 3$ . Из таких четырех династий в настоящее время известны только три, а именно с атомными весами типа  $4n$  (так называемый «ряд тория»);  $4n + 2$  («ряд радия»);  $4n + 3$  («ряд актиния»). Но династия  $4n + 1$  неизвестна — быть может потому, что радиоактивные элементы ряда



Родословное дерево урана-радия.

$4n + 1$  чересчур быстро распадаются, а следовательно, встречаются лишь в ничтожных количествах, ускользающих от наблюдения. В наших таблицах символы элементов написаны в кружках, где стоит еще и порядковый номер (число  $Z$ )

элемента; атомный вес написан рядом с кружком в скобках. Если данный элемент испытывает альфа-распад, то продукт распада помещается в таблице непосредственно под ним; если

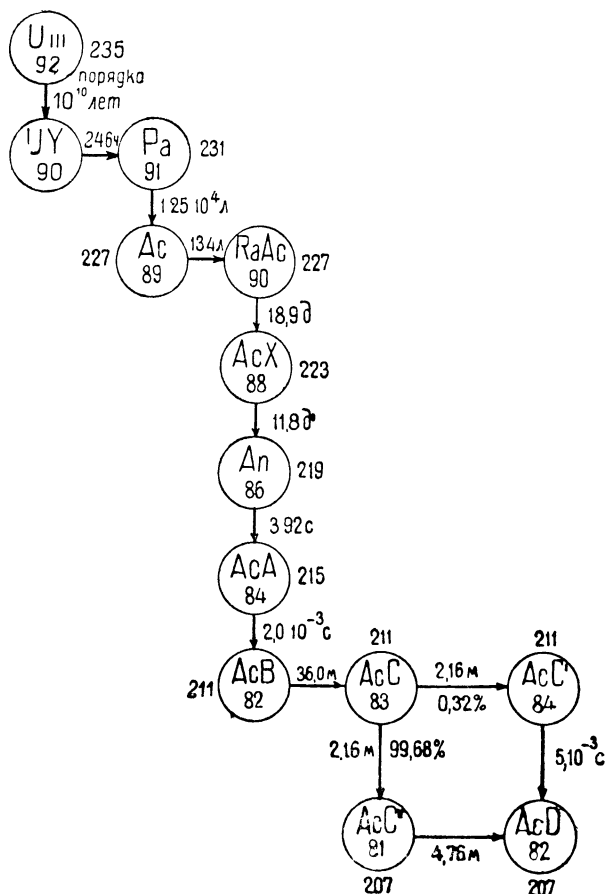


Родословное дерево тория.

же он испытывает бета-распад, то продукт распада располагается на той же строчке вправо. В каждом из трех рядов имеются и разветвления, причем в этих случаях указано, какой процент атомов данного элемента испытывает одно, а какой другое превращение. Так, например, как мы уже знаем, 99,96%



общего числа атомов радия С, испуская бета-частицу, превращается в радий С', остальные же 0,04% испускают альфа-частицу и превращаются в радий С". Все три ряда обнаруживают



Родословное дерево актиния.

между собой некоторое сходство, которое становится еще более заметным благодаря разумной номенклатуре: так, например, три металла, похожих по свойствам на барий,  $Z = 88$

(торий X, радий и актиний X), превращаются в благородный газ  $Z=86$  (эманация радия, эманация тория и эманация актиния или торон, радон, актинон), а затем дают сходные и по химическим свойствам ( $Z=84$ ) и по названиям элементы торий А, радий А, актиний А и т. д. и т. д. У каждой черты, соединяющей элемент с его продуктом распада выписана также и продолжительность жизни этого элемента. Для облегчения чтения таблицы заметим, что U читается уран, Io — ионий, Ra — радий, Rn — радон, Ac — актиний, RdAc — радиоактиний, An — актинон, Th — торий, MsTh — мезаторий, RdTh — радиоторий, Tn — торон. Заметим также, что в таблицах указаны и те приближенные атомные веса, которые не измерены, а вычислены по правилу сдвига. Атомные веса элементов ряда актиния вообще не очень достоверны.

Кроме элементов, указанных в таблице, радиоактивными элементами являются также калий ( $Z=19$ ) и рубидий ( $Z=37$ ). Еще в 1906 году Кэмбелл и Вуд открыли, что оба эти металла испускают бета-лучи чрезвычайно малой интенсивности, и с тех пор этот факт неоднократно подтверждался и другими исследователями; в 1928 году Кольхерстер наблюдал и гамма-излучение калия. В 1926 году Холмс и Лоусон оценили (по числу бета-электронов) период полураспада калия приблизительно в  $1,4 \cdot 10^{12}$  лет, а рубидия — приблизительно в  $10^{11}$  лет. Однако не следует забывать, что эти числа относятся к тому предположению, что активны все ядра калия и рубидия; если же радиоактивность есть свойство лишь одного из изотопов, то период полураспада будет меньше. Никакие продукты распада в этих металлах химическим анализом не обнаружены (так их мало). Из исследований Астона, о которых речь будет ниже, явствует, что калий есть смесь изотопов с атомными весами 85 и 87. Можно было бы предполагать, что радиоактивным является какой-то третий изотоп, встречающийся в слишком

ничтожных количествах для того, чтобы быть обнаруженным каким-либо образом помимо его радиоактивности. В 1927 году Хевеши и Хенигсмид сумели произвести частичное разделение изотопов калия, после чего Бильц и Цигерт показали, что активность повышается вместе с концентрацией изотопа 41. Повидимому этот изотоп калия и является активным. Так как на 20 атомов обыкновенного калия всего лишь один имеет вес 41, то вычисление дает для периода полу-распада этого изотопа около  $7,5 \cdot 10^{10}$  лет. Продуктом распада является, следовательно, неизвестный нам изотоп кальция с атомным весом 41. (В 1930 году ленинградские химики А. В. Фрост и О. Фрост нашли, что атомный вес кальция в уральском минерале микроклине, содержащем также и калий, равен 40,2, т. е. выше, чем обычный атомный вес кальция, который равен 40,07. Это, быть может, указывает на присутствие некоторого количества изотопа кальция с атомным весом 41, являющегося продуктом распада калия).

В 1932 году Хевеши (уже известный нам по истории открытия гафния) неожиданно обнаружил, что радиоактивным является и элемент самарий ( $Z = 62$ ). Он испускает довольно медленные альфа-частицы (их скорость — 10 000 км/сек). Продолжительность жизни самария по расчетам Хевеши равна  $1,2 \cdot 10^{12}$  лет (это число, вероятно, во много раз превышает возраст земного шара). Открытие Хевеши заставило физиков и химиков исследовать — а нет ли еще радиоактивных элементов среди тех, которые давно были открыты химиками? И в 1933 году американцы В. Ф. Либби и В. М. Лэтимер нашли, что слабой радиоактивностью обладает элемент неодимий ( $Z = 60$ ). Он испускает бета-лучи, и его продолжительность жизни достигает, как у самария, миллиона миллионов лет.

Сделаем еще одно замечание по поводу наших таблиц радиоактивных элементов. Рассматривая таблицу, озаглавленную «Родословное дерево урана-радия», читатель видит

кроме разветвления между радием С и радием D еще одно разветвление, а именно после элемента  $UX_1$  (уран икс первый): 99,65% ядер урана  $X_1$  превращаются в уран  $X_2$ , а остальные 0,35% в уран Z (UZ). Уран  $X_2$  и уран Z — это разные по своим радиоактивным свойствам вещества: оба они испускают бета-частицы, но с различной продолжительностью жизни, да и энергии у их бета-частиц тоже неодинаковы. А между тем и уран  $X_2$  и уран Z получились из урана  $X_1$  в результате испускания бета-частиц. Значит ядра урана  $X_2$  и урана Z, на основании правил сдвига, имеют не только одинаковый заряд и одинаковый порядковый номер в периодической системе элементов, но и одинаковый атомный вес, хотя радиоактивные (а может быть и какие-нибудь иные) их свойства различны. Такие два атома, которые не только являются изотопами (одинаковый заряд ядра), но и имеют одинаковый атомный вес, хотя и не все их свойства при этом одинаковы, носят название «изомеров». Случаи изомеров очень редки: кроме этого случая ( $UX_2$  и UZ), физика знает еще только один такой случай, да и тот сомнителен; о нем будет сказано дальше. Возможно, что изомеры способны иногда превращаться друг в друга; но этого еще никто не наблюдал.

Хотя в наших таблицах и размещено очень большое количество радиоактивных элементов, но тем не менее все они оказываются изотопами лишь очень небольшого числа элементов. Радиоактивные изотопы одного и того же элемента сравнительно легко отличить друг от друга: характер их радиоактивных излучений позволяет определить их индивидуальность без особого труда. Быстрота спадания активности, скорость испускаемых частиц и т. п. — все это может служить для того, чтобы легко отличать радиоактивные изотопы друг от друга. Изучение радиоактивных явлений и в особенности «правила сдвига» Фаянса и Содди очень быстро убедили физиков в том, что могут существовать различ-

ные разновидности одного и того же химического элемента, обладающие почти одинаковыми химическими свойствами: впервые физики столкнулись с такой химической тождественностью двух веществ, отличающихся своими радиоактивными свойствами в 1906 году, когда американский физик Болтвуд, нечаянно смешав соединения иония и тория, убедился в том, что их уже никакими способами невозможно снова разлучить друг с другом. И все это естественно наводило на мысль о том, что и в области нерадиоактивных химических элементов могут существовать изотопы — разновидности одного и того же химического элемента, имеющие разный атомный вес, но одинаковый заряд и одинаковые химические свойства. Эта мысль пришла в голову Содди, который в 1910 году напечатал в одном американском журнале статью, где высказывал следующую гипотезу: обыкновенные химические элементы могут в действительности оказаться смесями нескольких изотопов с различными весами атомов. Заметим, что в XIX столетии такую же самую мысль высказывал и Крукс. Однажды на съезде Британской Ассоциации (так называется английское общество естествоиспытателей, физиков и химиков), происходившем в 1886 году в Бирмингэме, Крукс произнес речь, в которой сказал следующее: «Я думаю, что когда мы говорим, например, что атомный вес кальция равняется 40, то в действительности мы выражаем этим тот факт, что большинство атомов кальция действительно имеет атомный вес 40, но может быть существует и небольшое число атомов с весами 39 и 41, или даже с весами 38 и 42 и т. д. Не является ли возможным и осуществимым в некоторых случаях путем какого-нибудь искусственного процесса отделить более легкие атомы от более тяжелых? Такое разделение могло бы происходить при сгущении вещества из первоначального раскаленного состояния; оно может также происходить и в геологические эпохи при последовательных растворениях и осаждениях горных пород.

Это может показаться чересчур смелой гипотезой; но я не думаю, что в химии нет средств ее проверить». Однажды Крукс подумал даже, что ему удалось наткнуться на такой случай отделения друг от друга различных разновидностей одного и того же элемента. Это было тогда, когда он приступил к изучению редкоземельных элементов, о которых мы говорили в предыдущей главе. Они действительно очень похожи друг на друга, и поэтому Крукс подумал, что они являются разновидностями одного и того же химического элемента. Но впоследствии эта мысль была оставлена как ошибочная, и вместе с ней заглохла и гипотеза Крукса о возможном существовании атомов разного веса у одного и того же химического элемента. Поэтому когда в 1910 году Содди высказал ту же самую мысль, то она была сочтена совершенно новой. Круксу в свое время никто не хотел верить; но Содди все сразу поверили, потому что если существуют изотопы у радиоактивных элементов, то почему бы им не существовать и у обыкновенных нерадиоактивных элементов?

Гипотеза о существовании изотопов у нерадиоактивных элементов одновременно вызвала к жизни еще и другую гипотезу. Просматривая таблицы радиоактивных элементов, читатель может убедиться в том, что все указанные там атомные веса или являются просто целыми числами или, по крайней мере, очень близки к целым числам. Между тем у обыкновенных элементов (не радиоактивных) встречаются и резкие отступления от целочисленности (например атомный вес хлора равен 35,45). Возможно, что читатель этой книжки уже успел забыть о старинном английском враче Вильяме Прауте (см. главу II), который в 1816 году выступил со своей неудачной гипотезой о том, что все веса атомов, выраженные в единицах, равных весу атома водорода, должны быть целыми числами. Ведь Берцелиус своими точными измерениями сумел опровергнуть эту странную фантазию Праута. Но, если мы, вместе с Содди, предположим, что любой

химический элемент может оказаться на самом деле смесью различных изотопов, обладающих разными атомными весами, то идея Праута покажется нам уже не такой вздорной. Ведь если бы у отдельных изотопов атомные веса были целыми числами, то средний атомный вес — тот самый, который определяют в своих измерениях химики, имеющие дело со смесью изотопов, мог бы оказаться и дробным. Если, например, хлор, у которого атомный вес равен 35,45 и который был с точки зрения Берцелиуса сильнейшим доводом против Праута, на самом деле состоит из смеси изотопов с целыми атомными весами, скажем 35 и 36, то ведь идея Праута в конце концов все-таки оказывается верной!

Эта мысль все время была в головах физиков. В той статье Содди, о которой мы недавно упомянули, где Содди выставил, впервые после Крукса, гипотезу о существовании изотопов у нерадиоактивных элементов, говорится: «Химическая однородность вещества совсем не доказывает, что данный элемент не есть смесь нескольких разновидностей с различными атомными весами. Если это действительно так, то отсутствие простых численных соотношений между атомными весами становится менее удивительным» (последние слова Содди, в сущности, имеют тот смысл, что гипотеза изотопов позволяет понять, почему не все атомные веса являются целыми числами).

Первым физиком, действительно открывшим существование изотопов у нерадиоактивных элементов был Дж. Дж. Томсон. Способ, которым он воспользовался, заключался в исследовании так называемых «положительных лучей».

Что же такое эти «положительные лучи»? В главе III мы рассматривали явления, происходящие в разрядных трубках Крукса — в трубках, наполненных очень разреженным газом, через которые пропускается электрический ток. Мы говорили о том, что в этих трубках от отрицательного полюса (катода) распространяются перпендикулярно к его поверх-

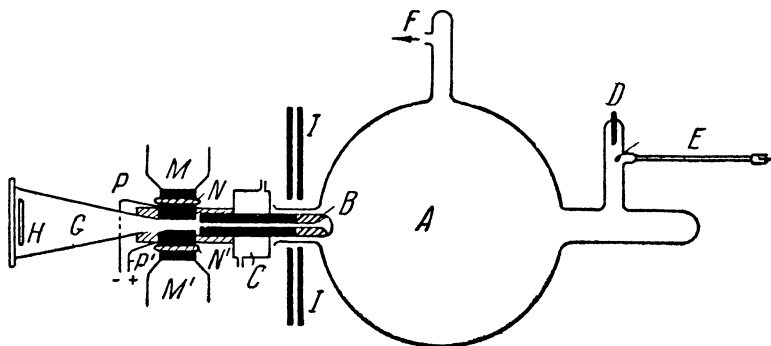
ности особые лучи (катодные лучи), которые по исследованиям Дж. Дж. Томсона оказались потоком электронов. Но катодные лучи — это не единственный сорт лучей, существующий в такой разрядной трубке. В 1886 году немецкий физик Гольдштейн заметил, что если просверлить в катоде разрядной трубки отверстие, то из этого отверстия идут особые лучи, которые распространяются в направлении противоположном направлению катодных лучей. Вот эти-то лучи и исследовал Дж. Дж. Томсон. Он и дал им название положительных лучей, потому что они представляют собой поток частиц, заряженных положительным электричеством.

Происхождение этих частиц такое: в том разреженном газе, которым наполнена разрядная трубка, создается большое количество ионов, т. е. у молекул и атомов газа отрываются электроны, в результате чего нейтральная прежде молекула распадается на две заряженные части — отрицательный электрон и положительный заряженный остаток. Эти положительно заряженные остатки атомов и молекул движутся в электрическом поле в сторону противоположную той, куда движутся отрицательно заряженные электроны. Если в катоде трубки просверлить канал, то движущиеся к катоду положительно заряженные ионы проскользнут через этот канал и вынырнут на другую сторону катода — там, где больше нет электрического поля и где они продолжают двигаться уже с постоянной скоростью по прямым линиям. Если же в этом пространстве за катодом создать электрическое или магнитное поле, то проникшие туда положительные лучи будут искривляться именно так, как и следует ожидать от потоков частиц, заряженных положительным электричеством.

Приведем чертеж одного из приборов, которыми пользовался сэр Дж. Дж. Томсон. Электрический разряд, вызывающий появление положительных лучей, происходит в сосуде А, объем которого составляет полтора литра. В горлышке этого сосуда помещен катод В; он обращен к сосуду А алю-



миниевым круглым набалдашником, в середине которого сделано отверстие в форме воронки. Это отверстие затем переходит в канал длинной железной трубки (длина 7 см), составляющей продолжение катода. Через это отверстие в алюминиевом конце катода и через канал железной трубки потоки положительных ионов, образующихся в сосуде А, имеют возможность прорваться в главную часть прибора — туда, где этот поток положительно заряженных частиц может



Прибор Дж. Дж. Томсона.

изучаться посредством его отклонения в электрическом и магнитном поле. Чтобы покончить с описанием самой разрядной трубки, изображенной на чертеже, заметим, что С — это водяная ванна (так как катод во время работы сильно нагревается, то его приходится помещать в камеру с проточной водой), а D — анод (положительный полюс разрядной трубки). Через узенькую «капиллярную» трубочку Е в разрядную трубку все время просачивается тот газ, положительные ионы которого желательно изучать с помощью этого прибора, а через трубку F возможно производить откачку газа с помощью ртутного насоса.

Тонкий пучок положительных лучей, сумевших проскочить наружу через отверстие в катоде и через канал железной

трубки, пропускается затем между двумя железными пластинками  $P$  и  $P'$ , которые сами находятся между двумя полюсами ( $M$  и  $M'$ ), сильного электромагнита. Между этими пластинками  $P$  и  $P'$  поэтому имеется сильное магнитное поле. Те же самые пластинки могут быть присоединены и к полюсам аккумуляторной батареи; поэтому между ними существует не только магнитное, но и электрическое поле. Затем пучок положительных лучей проходит в фотографическую камеру  $G$ , из которой тщательно откачан воздух, и ударяется о фотографическую пластинку  $H$ .

Что должно отпечататься на этой пластинке? Положительно заряженные ионы, обладающие одним и тем же отношением заряда к массе ( $\frac{e}{m}$ ), но разными скоростями, должны попасть в различные точки этой фотографической пластинки. Если бы электрического и магнитного поля не было, то все они должны были бы упасть прямо в центр фотографической пластинки. Но электрическое и магнитное поле, существующее между железными пластинками  $P$  и  $P'$ , отклоняет летящие положительные ионы от первоначального направления их полета, а поэтому они уже падают не в центр фотографической пластинки, а ложатся по некоторой кривой линии, которая проходит через этот центр. Чем быстрее движутся положительные ионы, тем труднее электрическому и магнитному полю изменить направление их полета и тем ближе к центру фотографической пластинки они упадут на эту кривую; чем меньше скорость их полета, тем на более далекие точки кривой они попадут, когда дойдут до фотографической пластинки.

Итак, пучок положительных ионов, которые все одинаковы между собой (т. е. имеют одно и то же отношение  $\frac{e}{m}$ ), но движутся с разными скоростями, нарисует на фотографической пластинке какую-то кривую линию.

А если в той же самой разрядной трубке есть еще какой-то другой сорт положительных ионов, с каким-то другим отношением  $\frac{e}{m}$ , то этот другой сорт ионов нарисует на фотографической пластинке другую кривую.

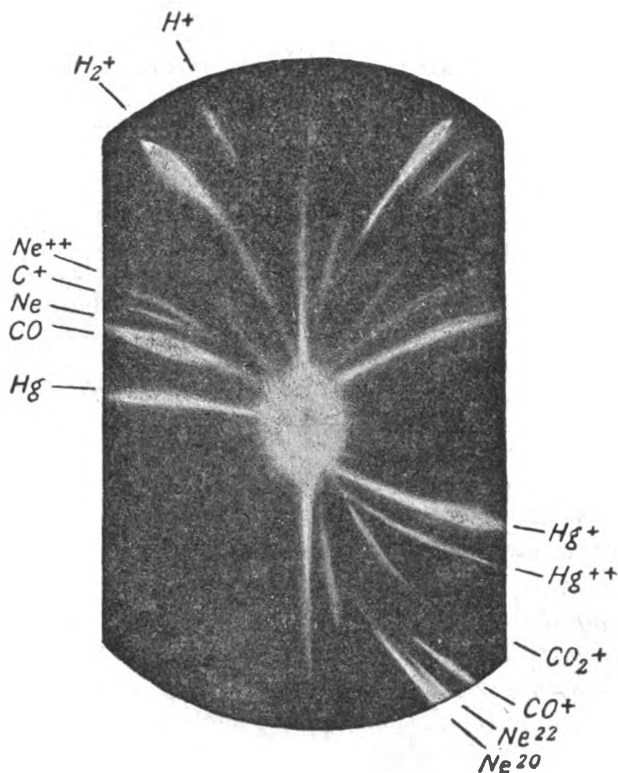
Значит на пластинке будет столько кривых, сколько сортов положительных ионов образуется в разрядной трубке.

Остроумная мысль Томсона заключалась в том, что если какой-нибудь газ состоит из нескольких изотопов, которые смешаны между собой, то отрывая по одному электрону от атомов разных изотопов, мы получим разные сорта ионов: заряд у них всегда будет одинаковый, но вес (масса) разный.

Поэтому дробь  $\frac{e}{m}$  у них будет разная, и они нарисуют на фотографической пластинке разные кривые.

Первым газом, который подвергся испытанию, был неон. Атомный вес неона равен 20,183. Из всех веществ с небольшим атомным весом неон дает самое большое отступление атомного веса от целого числа. Именно поэтому, когда летом 1912 года был окончательно сконструирован и установлен (в Кэвендишевской лаборатории в Кэмбридже) прибор для анализа положительных лучей электрическим и магнитным полями, Томсон решил избрать для исследования именно неон, считая, что в неоне всего легче можно будет различить друг от друга кривые, нарисованные на фотографической пластинке разными изотопами. В то время неон был еще чрезвычайно редким газом, и вероятно во всех лабораториях всего мира, вместе взятых, было не больше одного грамма чистого неона. (Теперь неон уже не редкость: он добывается заводским путем из воздуха, где имеется, как установил в 1898 году Вилльям Рэмзей, 0,0123 см<sup>3</sup> неона на каждый литр воздуха. Вероятно все читатели видели наполненные разреженным неоном трубки, которые светятся при прохождении электрического тока; они применяются в электрической

рекламе: в витринах магазинов, на вывесках кинематографов). Раздобыв нужное количество неона, Томсон наполнил им свою разрядную трубку (неона для этого требовалось не-



Параболы неона (по Дж. Дж. Томсону).

много, потому что ведь трубка наполняется очень разреженным газом) и заснял свои фотографии. Успех был полный. Вместо одной кривой, которая получилась бы, если бы неон состоял из одного сорта атомов, на фотографии получились две кривые (параболы): значит неон состоит из смеси двух разновидностей неона, двух изотопов неона.

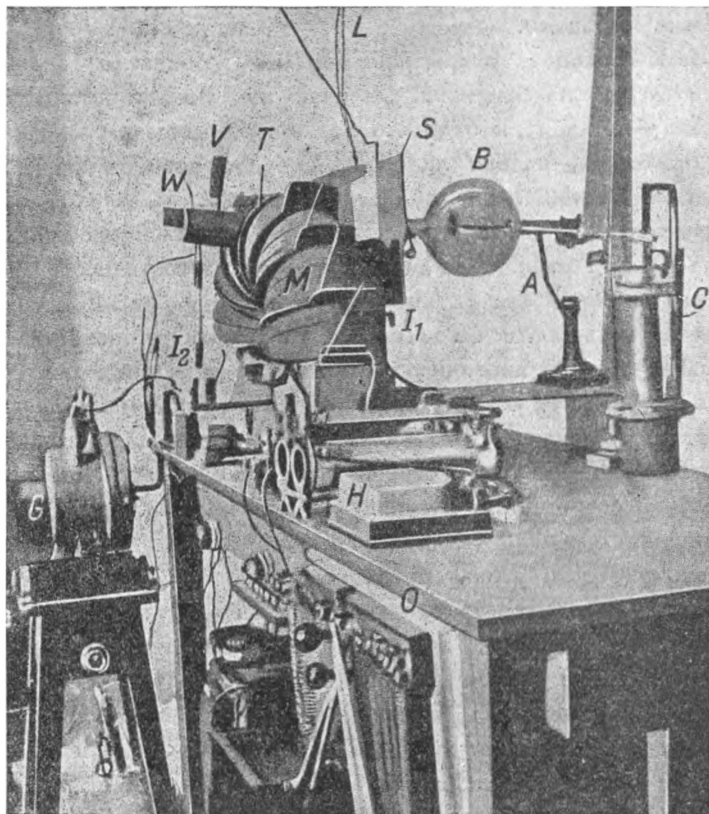
Томсон тщательно изучил полученные фотографии и подверг их точному математическому расчету. Зная силу того электрического и магнитного поля, которое было между железными пластинками прибора, и зная точные размеры всех частей прибора, можно было по форме и размерам каждой кривой, нарисованной данным сортом ионов на фотографической пластинке, вычислить отношение  $\frac{e}{m}$  для этого сорта ионов. Это отношение во столько же раз меньше отношения  $\frac{e}{m}$  для водородного иона (это отношение ведь уже известно нам из опытов с электролизом), во сколько раз вес иона данного сорта больше веса водородного иона. Иными словами можно вычислить атомный вес тех обоих сортов атомов, из которых состоит неон.

17 января 1913 года Дж. Дж. Томсон прочитал в «Королевском Институте» в Лондоне лекцию, в которой он рассказал о результатах своих подсчетов. Оказалось, что из двух сортов изотопов, смесь которых образует газ неон, один сорт имеет атомный вес 20, а другой — атомный вес 22. Оба атомных веса являются целыми числами. Большинство атомов неона имеют атомный вес 20, и лишь меньшинство имеет вес 22. Они смешаны между собой в такой пропорции, что в среднем получается атомный вес 20,18. Значит настоящие веса атомов действительно целые числа, как и предполагал Вильям Праут, забытый и осмеянный сто лет тому назад. Атомные веса, которые были измерены Берцелиусом и оказались не целыми числами, а целыми числами с дробью, — это такие же самые средние числа, какие можно найти в любой книжке по статистике. Если, например, в статистике говорится, что в такой-то стране на каждое крестьянское хозяйство приходится по 1,8 лошади и по 0,5 коровы, то ведь это не значит, что на крестьянском лугу пасется половина коровы. 0,5 коровы — это только среднее число. Такими же

средними числами являются и дробные атомные веса, измеряемые химиками.

Замечательное открытие Томсона произвело огромное впечатление на физиков. Сейчас же физики стали пробовать — нельзя ли отделить более тяжелые атомы неона от более легких, нельзя ли каким-нибудь способом разделить неон на «легкий неон» и «тяжелый неон».

За эту трудную задачу взялся талантливый ученик Томсона Ф. В. Астон. Для того, чтобы отделить тяжелые атомы неона (атомный вес 22) от легких (атомный вес 20), он решил воспользоваться тем самым способом, которым уже несколько лет пользовались химики для отделения благородных газов друг от друга, а именно «способом диффузии». Этот способ основан вот на чем: все газы обладают способностью просачиваться сквозь глиняную стенку, но только с разной скоростью. Чем тяжелее газ, тем медленнее он просачивается сквозь глину; чем он легче, тем быстрее. Поэтому Астон решил взять некоторое количество неона и дать ему возможность просачиваться через глиняную стенку: в той порции неона, которая успеет просочиться, процент легких атомов («неон двадцать») будет больше, чем в той, которая останется за глиняной стенкой. Таким образом получают две порции неона: в одной из них процент легких атомов будет выше обычной нормы, а в другой ниже. Каждую из двух этих порций можно будет еще раз разделить на две части, причем в одной из этих частей процентное соотношение обоих изотопов еще больше изменится в желательном направлении и т. д. и т. д. Если такое разделение повторить много раз, то от первоначальной порции в 100 см<sup>3</sup> неона, которую Астон выписал из Парижа для своей работы, удастся выделить хотя бы несколько кубических сантиметров такого неона, у которого процент легких атомов «неон двадцать» будет заметно выше нормы, и хотя бы несколько кубических сантиметров неона, у которого процент тяжелых атомов



**Фотография масс-спектрографа, установленного в Кэвендишской лаборатории в 1919 г.**

*B* — разрядная трубка. *A* — анод, соединенный с полюсом индукционной катушки, находящейся под столом. *C* — резервуар, заключающий газ, подвергающийся анализу. *I<sub>1</sub>*, *I<sub>2</sub>* — трубки с углем в жидком воздухе для создания вакуума в камере. *S* — пластины мягкого железа для магнитной защиты разряда. *L* — провода от батареи высокого напряжения к пластинам конденсатора. *M* — электромагнит Дюбуа. *T* — маленькая лампочка для фотографирования отправного пятна. *V* — устройство, препятствующее проникновению воздуха и света при передвижении фотографической пластинки. *W* — камера, слева от которой находится колпачок, защищающий от света. *H* — амперметр магнитной цепи. *O* — сопротивление для электрического тока в магнитной цепи. *G* — вращающийся ртутный насос Гэда, соединенный с камерой и разрядной трубкой при помощи стеклянных трубок и кранов.

«неон двадцать два» заметно выше нормы. На полное разделение изотопов Астон не мог надеяться, потому что для этого нужно было бы исходить из огромной порции неона и повторять пропускание через глину очень много раз. (Этот процент получения «легкого» и «тяжелого» неона немножко напоминает тот отбор семян или молодняка, который происходит на селекционных станциях или на конских заводах. Но там количество материала, который подлежит отбору, не уменьшается, потому что растения и животные размножаются, а в опытах с разделением изотопов материала для отбора становится все меньше и меньше). Наконец, после нескольких десятков пропусканий через глину, после долгой возни и неудач, Астон получил две порции неона (по 2—3 см<sup>3</sup> каждая), из которых одна была заметно более тяжелой, чем другая: средний атомный вес одной порции оказался 20,15, а другой — 20,28. Значит, действительно возможно добиться, если не полного, то по крайней мере частичного отделения изотопов друг от друга. Об этом своем успехе Астон рассказал на съезде Британской Ассоциации в Бирмингэме в 1913 году.

Замечательные работы английских физиков прервала на несколько лет мировая война. Научная жизнь совершенно замерла.

И только после окончания войны Астон вновь взялся за изучение изотопов. Он поставил себе целью построить прибор, который позволил бы производить анализ положительных лучей гораздо точнее и тоньше, чем тот прибор, который был построен Томсоном.

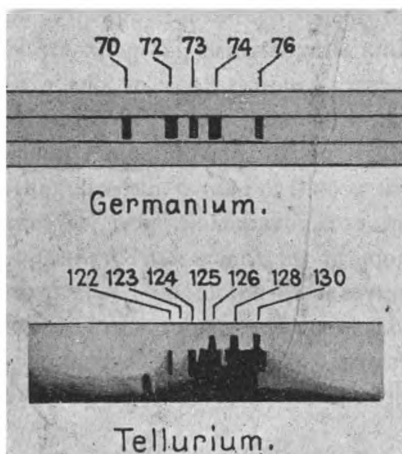
Такой прибор Астон действительно построил, и в 1919 году прибор был установлен в Кэмбридже в Кэвендишевской лаборатории<sup>1</sup>. Внешний вид этого прибора виден на прило-

---

<sup>1</sup> Кэвендишевская лаборатория, директором которой является лорд Резерфорд, — это наиболее замечательная во всем мире лаборатория по изучению атомного ядра. В ней были произведены исследования Резер-



женной здесь фотографии. Его устройство чрезвычайно сложно. Подробно описывать его мы не будем. Тонкий пучок положительных лучей проходит в этом приборе через электрическое и через магнитное поля, которые подобраны и расположены так, чтобы все положительные ионы, имеющие одинаковое отношение  $\frac{e}{m}$ , но какие угодно скорости, сходи-



Масс-спектры.

лись на фотографической пластинке в одной и той же точке. Все те точки, на которые могут падать ионы, расположены на фотографической пластинке на одной прямой линии. По расположению точки на этой прямой линии можно вычислить вес (массу) упавших в эту точку ионов. Внешний вид такой фотографии, по которой можно определять атомные веса отдельных изотопов, напоминает что-то вроде

спектра, а поэтому фотографические снимки, получаемые на

форда над рассеянием альфа-лучей, о которых мы говорили в предыдущей главе и благодаря которым было доказано существование атомного ядра. В ней же были сделаны и другие замечательные открытия, о которых будет рассказано в дальнейших главах (расщепление ядер, «ливни» Блэккета и Оккиалини). Кэвендишевская лаборатория является мировым центром науки об атомном ядре и хотя превосходные работы по ядру делаются и в других местах (например в Институте Кюри в Париже, в американских институтах и т. д.), но все же первенство остается безусловно за Кэвендишевской лабораторией. Свое название Кэвендишевская лаборатория получила от имени Генри Кэвендиша, гениального химика, жившего в конце XVIII столетия и знаменитого своими открытиями — химическими (анализ воздуха) и физическими (вычисление веса земного шара).

приборе Астона, были названы «масс-спектрограммами», а сам прибор получил название «масс-спектрографа».

Пользуясь своим масс-спектрографом, Ф. В. Астон уже пятнадцать лет изучает атомные веса изотопов, из смеси которых состоят обычные химические элементы. Результаты этих исследований вполне подтверждают старую гипотезу Вилльяма Праута: атомные веса изотопов действительно всегда оказываются целыми числами. Веса отдельных атомов действительно всегда в целое число раз больше, чем вес атома водорода. Так, например, тот же самый хлор, который служил самым веским доводом Берцелиуса против Праута, оказался смесью двух изотопов: 59% общего числа атомов хлора имеют атомный вес 35, а остальные 41% — атомный вес 37. (Возможно, что есть еще очень маленькое количество третьего изотопа с атомным весом 39). Средний атомный вес атомов этой смеси составляет как раз 35,45 — тот вес, который был измерен химиками. У многих веществ, исследованных Астоном, количество изотопов оказалось весьма большим: например, обыкновенный нерадиоактивный свинец, имеющий атомный вес 207,22, состоит из девяти изотопов с атомными весами 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210. Из всех этих изотопов оказывается наиболее распространенным изотоп «свинец двести шесть» ( $\text{Pb}^{206}$ , как принято его обозначать): около 87% атомов свинца имеют именно этот вес. Около 9% атомов свинца имеет атомный вес 207, около 4% — атомный вес 208. Количества остальных изотопов весьма малы. Заметим, что открытый Астоном нерадиоактивный изотоп  $\text{Pb}^{210}$  является изомером радиоактивного изотопа «радий D». Это — второй из двух известных в настоящее время примеров изомерии (о первом примере —  $\text{Uz}$  и  $\text{Ux}_2$  говорилось выше). Впрочем, существование изотопа  $\text{Pb}^{210}$  еще не установлено окончательно. Возможно, что он и не существует.

Когда Вилльям Праут высказал свою гипотезу о том, что

все атомные веса являются целыми числами, он исходил при этом из другой необыкновенно смелой гипотезы: все атомы построены из одного и того же материала, все они состоят из атомов водорода. Эта мысль Праута была основана не на чисто научных, а на философских соображениях: ему казалось совершенно невероятным, чтобы мир был построен из такого большого числа различных сортов частиц, каково число химических элементов. Число известных нам химических элементов составляет девять десятков. Неужели же имеется девять десятков сортов кирпичиков, из которых построены все тела, и эти кирпичики совершенно ничего общего не имеют друг с другом? Когда были открыты радиоактивные изотопы и когда вслед за этим Дж. Дж. Томсон доказал существование двух изотопов неона, загнанная в подполье мысль Праута внезапно возродилась с новой силой. Все атомы весят в целое число раз больше, чем водород, именно потому, что каждый атом состоит, в конечном счете, из атомов водорода — электрон и ядро атома водорода являются основными кирпичиками мироздания, и все на свете построено из них и только из них! К такому заключению пришли физики сразу же после открытия изотопов неона, а дальнейшие работы Астона могли только еще больше подкрепить это убеждение. Сейчас же было придумано для атомного ядра водорода особое название, которое должно было подчеркнуть важную роль, приписываемую водородному ядру, — роль одного из двух кирпичей мироздания. Ядро водородного атома получило название «протон» (от греческого слово «протос» — простой), и физики уверовали в то, что все атомы всех химических элементов построены из протонов и электронов. Как представить себе, например, атом  $\text{Cl}^{35}$  (изотоп хлора с атомным весом 35)? Он должен быть построен из 35 атомов водорода, согласно гипотезе Праута, т. е. из 35 протонов и 35 электронов. Порядковый номер элемента хлора в периодической системе Менделеева равен 17, т. е. у нейтрального (незаряжен-

ного электричеством) атома хлора электронная оболочка состоит из 17 электронов. Остальные 18 электронов и все 35 протонов крепко сцеплены друг с другом, образуя ядро «хлора тридцать пять». Это дает правильный вес ядра (так как весом электронов можно, вследствие ничтожности этого веса, пренебречь, то это даст вес ядра равный 35 в обыкновенных единицах атомного веса) и правильный заряд ядра (35 положительных элементарных зарядов — протонов — и 18 отрицательных элементарных зарядов — электронов — в сумме дают 17 положительных зарядов, т. е. столько, сколько действительно должно иметь ядро хлора). Совершенно таким же образом объяснялось и устройство остальных атомов. Атомное ядро «хлора тридцать семь», например, можно представить себе как очень тесную комбинацию из 37 протонов и 20 электронов; остальные 17 электронов образуют электронную оболочку этого атома.

Альфа-частица, которая есть не что иное, как ядро атома гелия, состоит, согласно этому представлению, из крепко сцепившихся друг с другом четырех протонов и двух электронов. Число протонов в ядре всегда больше числа электронов, а недостающее число электронов находит себе место в электронной оболочке атома. Так, например, атом урана можно представлять себе так: ядро атома урана состоит из 238 протонов и 146 электронов; остальные 92 электрона помещаются в электронной оболочке атома урана.

Трудно указать определенного автора этой идеи: настолько естественной показалась она всем физикам, что ее высказали сразу очень многие, как только были установлены целые атомные веса изотопов. Одним из важнейших следствий этой идеи было то, что физики стали рассматривать атомное ядро любого атома как сложную систему, состоящую из частей и поэтому способную распадаться на части. В сущности это ясно уже из самого факта существования радиоактивности. Если атомные ядра радиоактивных элементов распадаются,

испуская из себя электроны и альфа-частицы, то, значит, эти ядра состоят из частей, и, вероятно, ядра обыкновенных (нерadioактивных) атомов химических элементов тоже состоят из частей: эти части необыкновенно крепко связаны друг с другом и не хотят расцепиться, не хотят распасться. Ну так что ж! Быть может их удастся насильно оторвать друг от друга, насильно выбить из атомного ядра несколько протонов или несколько электронов и тем самым искусственно изменить химическую природу атома. Так встала перед физикой задача искусственного расщепления атомных ядер, искусственного превращения одних химических элементов в другие. И это было началом того ожесточенного штурма атомного ядра, который в конце концов привел к решению этой задачи. (О штурме атомного ядра будет рассказано в следующей главе).

Но гипотеза о том, что все атомы состоят из того же самого материала, из которого построен водород, — из протонов и электронов, — с самого начала натолкнулась на одну трудность. Эта трудность заключается в том, что хотя атомные веса изотопов действительно суть целые числа, но все же они не в точности равны целым числам, а только приблизительно. Это было обнаружено как только Астон научился с помощью своего масс-спектрографа определять относительные веса изотопов очень точно. Так, например, если принять вес альфа-частицы (т. е. вес атомного ядра гелия) за 4, то вес ядра кислорода («кислород шестнадцать») не будет равен 16, как должно было бы быть, а 15,99. В той же самой системе единиц вес ядра неона («неон двадцать») будет не равен 20, а 19,99. А между тем по сделанной гипотезе ядро кислорода  $O^{16}$  состоит из того же материала, из которого состоят четыре альфа-частицы (16 протонов и 8 электронов); ядро неона  $Ne^{20}$  состоит из пяти альфа-частиц (20 протонов и 10 электронов). Такое же несоответствие обнаруживается в следующем примере: если принять вес атома (а не ядра) гелия за 4,0000,

то вес атома водорода должен был бы быть ровно в четыре раза меньше, т. е. должен был бы быть равен 1,0000, а в действительности он равен 1,0072.

Все эти несоответствия грозили совершенно разрушить прекрасную гипотезу Праута. Как можно считать, что атом гелия состоит из тех же самых частиц, из которых состоят четыре атома водорода, если четыре атома водорода весят больше, чем атом гелия? Не на много больше, но все-таки больше. Как можно после этого придерживаться гипотезы Праута?

Объяснение этой неприятной трудности было дано гениальным немецким ученым Альбертом Эйнштейном. Его объяснение состоит в следующем.

Соединить четыре атома водорода, так чтобы получился атом гелия, это не все равно, что приложить друг ко другу четыре яблока или слить вместе в одно ведро воду, которая была в четырех бутылках. При соединении четырех атомов водорода в один атом гелия может выделяться энергия, например, в виде каких-нибудь чрезвычайно жестких гамма-лучей. Еще никто никогда не наблюдал в лаборатории как четыре атома водорода сливаются в один атом гелия, но нет ничего невозможного в том, что если каким-нибудь способом осуществить это явление (превращение водорода в гелий), то при этом будет выделяться энергия. Выделяется же энергия при соединении водорода с кислородом, при котором образуется вода. Почему бы ей не выделяться при соединении четырех атомов водорода в один атом гелия? А если только мы допустим, что это действительно так, то можно будет понять, почему вес атома гелия меньше, чем вес четырех атомов водорода. Все дело в том, что энергия, как утверждает теория Эйнштейна, имеет вес, а поэтому когда из какого-нибудь тела выделяется энергия, то вес этого тела уменьшается. Вычисления Эйнштейна, основанные на законах электромагнитного поля, показали, что с каждой ка-

лорией энергии связан вес  $4,67 \cdot 10^{-14}$  гр. Поэтому когда соединяются 16 гр кислорода и 2 гр водорода, образуя при этом воду (а при этом выделяется, как показывают измерения 68 000 калорий), то потеря веса будет всего только  $3,1 \cdot 10^{-9}$  гр, а этого не смогут обнаружить никакие самые точные химические весы. Поэтому мы обыкновенно совершенно пренебрегаем таким уменьшением веса и просто говорим, что 16 гр кислорода и 2 гр водорода образуют 18 гр воды. Но энергия, которая выделяется при превращениях атомных ядер, во много раз больше, чем та, которая выделяется в химических реакциях. Мы уже встречались с этими цифрами: превращение одного грамма радия в радон и гелий сопровождается выделением  $4,4 \cdot 10^8$  калорий. Если же взять полную энергию, выделяемую не только при этом, но и при всех последовательных превращениях, то окажется, что превращение одного грамма радия в гелий и в свинец сопровождается выделением  $2,9 \cdot 10^9$  калорий (в 85 000 раз больше, чем при горении грамма водорода), а полная энергия, выделяемая при превращении одного грамма урана в гелий и в свинец, равна  $3,3 \cdot 10^9$  калорий. Отсюда видно, что при превращении атомных ядер могут выделяться воистину огромные количества энергии, и нет ничего удивительного в том, что мы уже оказываемся в состоянии обнаружить происходящее при этом уменьшение веса.

Можно воспользоваться соотношением Эйнштейна (с каждой калорией связан вес  $4,67 \cdot 10^{-14}$  гр), чтобы вычислить сколько же выделится энергии, если удастся превратить один грамм водорода в гелий. Этот расчет очень прост: 4 атома водорода весят 4,0288 (если за единицу веса взять четверть веса атома гелия). Превращаются они в атом гелия, который весит 4,0000. Уменьшение веса составляет 0,71% веса водорода, который участвовал в этой «реакции». Значит из одного грамма водорода должно получиться 0,9929 гр гелия. По соотношению Эйнштейна, каждому потерянному грамму

соответствует  $2,14 \cdot 10^{18}$  калорий. Значит потерянным  $0,0071$  гр веса соответствует  $1,52 \cdot 10^{11}$  калорий. Вот сколько энергии должно выделяться при превращении одного грамма водорода в гелий. Это еще в пятьдесят раз больше, чем энергия, выделяющаяся при превращении грамма урана в гелий и свинец.

Много ли это? Вспомним, что проектная мощность Днепрогэса составляет 900 тысяч лошадиных сил, т. е. около  $6,6 \cdot 10^5$  киловатт. Это значит, как показывает расчет, что в течение часа Днепрогэс должен дать  $5,7 \cdot 10^{11}$  калорий. Отсюда следует, что превращение одного грамма водорода в гелий может дать столько энергии, сколько должен давать весь Днепрогэс в течение 16 минут. Жаль только, что в настоящее время физики пока совершенно ничего не знают о том, какими способами можно заставить водород превращаться в гелий. Нет даже никаких сколько-нибудь разумных подходов к решению этой задачи.

Таким образом неполное совпадение атомных весов изотопов с целыми числами все же не обозначает еще опровержения гипотезы Праута. То целое число, которое ближе всего подходит к атомному весу данного изотопа, действительно определяет собой из скольких протонов и из скольких электронов состоит данный атом. Обозначим это целое число буквой  $M$ . Это целое число, да еще целое число  $Z$  (порядковый номер в периодической системе), определяет внутреннее устройство и состав той сложной системы, которой является атом. Алгебраически можно так формулировать гипотезу о составе атомного ядра, появившуюся в физике после открытия того факта, что веса изотопов — целые числа:

Каждый атом, характеризуемый числами  $M$  и  $Z$ , состоит из ядра и электронной оболочки, причем ядро состоит из  $M$  протонов и  $(M - Z)$  электронов, а остальные  $Z$  электронов образуют электронную оболочку.



Отступление же точного атомного веса данного атома от целого числа  $M$  пропорционально той энергии, которая выделяется при образовании этого атома из  $M$  атомов водорода.

Приведем теперь таблицу изотопов. Эта таблица представляет результат многолетней работы Астона и некоторых других ученых. (В последнее время, например, очень ценные данные при работе с масс-спектрографом получил американец Бейнбридж в Чикаго. Еще более интересно сделанное американцами же открытие изотопа водорода с атомным весом 2, о котором будет дальше рассказано подробно. Но наибольшая часть всех добытых результатов принадлежит все-таки самому Астону).

Открытие изотопов нерадиоактивных элементов привело к многочисленным попыткам разделения изотопов. Мы уже познакомились со «способом диффузии», который применил в 1913 году Астон и с помощью которого ему удалось добиться частичного разделения изотопов неона. Другим таким же способом является способ выпаривания данного химического элемента, находящегося в жидком состоянии, под очень низким давлением: атомы более легкого изотопа легче высккивают из жидкости в пар, а поэтому жидкость все более и более обогащается тяжелым изотопом. Этим способом воспользовались в 1920—21 гг. Бронстед и Хевеши для частичного разделения изотопов ртути. В результате длинной и трудной работы они получили  $0,2 \text{ см}^3$  ртути с плотностью, которая была на  $0,026\%$  меньше обычной плотности ртути и  $0,3 \text{ см}^3$  ртути, плотность которой была на  $0,023\%$  выше нормальной. В последнее время в Америке стали пользоваться в качестве способа разделения изотопов самим масс-спектрографом: электрическое и магнитное поля разделяют пучок положительных ионов, и эти ионы улавливаются в разные сосуды — для каждого изотопа свой сосуд.

## ТАБЛИЦА ИЗОТОПОВ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ В ПРИРОДЕ.

(После названия элементов приведены целые числа, ближайшие к атомным весам изотопов. Радиоактивные изотопы набраны курсивом. Изотопы расположены в таком порядке, что сперва идут изотопы, наиболее распространенные в природе, а затем менее распространенные).

1. Водород 1, 2, 3	37. Рутений 85, 87	67. Хольмий 165
2. Гелий 4	38. Стронций 88, 86, 87	68. Эрбий 166, 167, 168, 170
3. Литий 7, 6	39. Иттрий 89	69. Тулий 169
4. Бериллий 9 (8)	40. Циркон 90, 94, 92, 96, 91	70. Иттербий 174, 171, 172, 173, 176
5. Бор 11, 10	41. Ниобий 93	71. Кассиопей 175
6. Углерод 12, 13	42. Молибден 98, 96, 95, 92, 94, 100, 97	72. Гафний 177, 179, 178, 180, 176
7. Азот 14, 15	43. Магний 24	73. Тантал 181
8. Кислород 16, 18, 17	44. Рутений 102, 101, 104, 100, 99, 96, (98)	74. Вольфрам 184, 186, 182, 183
9. Фтор 19	45. Родий 103	75. Рений 187, 185
10. Неон 20, 22, 21	46. Палладий	76. Осмий 192, 190, 184, 188, 186, 187
11. Натрий 23	47. Серебро 107, 109	77. Иридий
12. Магний 24, 25, 26	48. Кадмий 114, 112, 110, 111, 113, 116, (108), (118)	78. Платина
13. Алюминий 27	49. Индий 115	79. Золото
14. Кремний 28, 29, 30	50. Олово 120, 118, 116, 121, 119, 117, 122, 121, 112, 114, 115	80. Ртуть 202, 200, 199, 201, 198, 204, 196, 197, 204
15. Фосфор 31	51. Сурьма 121, 123	81. Таллий 205, 203, 207, 208, 210
16. Сера 32, 34, 33	52. Теллур 130, 128, 126, 125, 124, 122, 123, (127)	82. Свинец 208, 206, 207, 204, 209, 210, 203, 205, 210, 211, 212, 214
17. Хлор 35, 37	53. Йод 127	83. Бисмут 209, 210, 211, 212, 214
18. Аргон 40, 36, 38	54. Ксенон 129, 132, 131, 134, 136, 128, 130, 126, 124	84. Полоний 210, 211, 212, 214, 215, 216, 218
19. Калий 39, 41	55. Цезий 133	85. (Алабамий)
20. Кальций 40, 44, 42, 43	56. Барий 138, 137, 136, 135	86. Радон 219, 220, 222
21. Скандий 45	57. Лантан 139	87. (Виргиний)
22. Титан 48, 46, 47, 49, 50	58. Церий 140, 142	88. Радий 223, 224, 226, 228
23. Ванадий 51	59. Празеодим 141	89. Активный 227, 228
24. Хром 52, 53, 50, 54	60. Неодим 142, 144, 146, (145), (143)	90. Торий 227, 228 330, 231, 232, 234
25. Марганец 55	61. Илмний	91. Протактиний 231, 234, 234
26. Железо 56, 54	62. Самарий 152, 154, 147, 148, 149, 150	92. Уран 238, 234
27. Кобальт 59	63. Европий 151, 153	
28. Никкель 58, 60	64. Гадолиний 155, 156, 157, 158, 160	
29. Медь 63, 65	65. Тербий 159	
30. Цинк 64, 66, 68, 67, 70	66. Диспрозий 161, 162, 163, 164	
31. Галлий 69, 71		
32. Германий 74, 72, 70, 73, 76		
33. Мышьяк 75		
34. Селен 80, 78, 76, 32, 77, 74		
35. Бром 79, 81		
36. Криптон 84, 86, 82, 83, 80, 78		

Этот способ приводит к полному разделению изотопов, количества получаемых при этом однородных веществ очень малы.

Только в одном единственном случае удалось провести разделение изотопов в большом масштабе. Речь идет о изотопе водорода с атомным весом 2. Открытие этого изотопа и его выделение в чистом виде принадлежит к числу замечательнейших страниц истории науки.

История открытия тяжелого изотопа водорода такова: в 1929 году были открыты изотопы кислорода с атомными весами 17 и 18. Количество этих изотопов чрезвычайно малы: в обыкновенном кислороде на 10 000 атомов имеется всего 16 атомов с атомным весом 18 и 3 атома с атомным весом 17. Открытие изотопов кислорода послужило причиной другого важного открытия — открытия изотопа водорода. Дело происходило так: американские физики Бердж и Мендель обратили внимание на то, что если выбрать единицу атомного веса так, чтобы средний атомный вес кислорода был равен 16,000, то измеренный химиками атомный вес водорода будет 1,00777. А если выбрать единицу атомного веса так, чтобы шестнадцать равнялся не средний атомный вес кислорода, а вес изотопа «кислород шестнадцать», то средний атомный вес кислорода станет немножко больше, и соответственно этому повысится и атомный вес водорода. Зная, сколько в кислороде находится атомов с атомными весами восемнадцать и семнадцать, легко сделать этот подсчет. Результат подсчета таков: измеренный химиками атомный вес водорода становится равен 1,00799, если вес атома «кислород шестнадцать» условно принять за 16,0000. Но Астон в своем масс-спектрографе очень точно измерил отношение веса обычного атома водорода к весу атома «кислород шестнадцать», и оказалось, что если вес атома «кислород шестнадцать» принять за 16,0000, то вес обыкновенного водородного атома равен 1,00756.

Получалось несоответствие: в одних и тех же единицах вес

обыкновенного водородного атома равнялся 1,00756, а измеренный химиками атомный вес водорода оказывался больше, а именно 1,00799. Различие между этими цифрами совершенно ничтожное: оно начинается только на четвертой цифре после запятой, но этого было совершенно достаточно, чтобы Бердж и Мендель с уверенностью заявили: измеренный химиками атомный вес водорода оказывается больше, чем было бы нужно по измерениям Астона, потому что в обыкновенном водороде, которым они пользовались, есть примесь более тяжелого изотопа.

Когда-то, в конце XIX столетия, английские ученые Рэлей и Рэмзэй обратили внимание на маленькое несоответствие между плотностью азота, добытого из аммиака, и плотностью азота, добытого из атмосферного воздуха. «Атмосферный» азот был немножко плотнее, чем «аммиачный» азот. Различие было только в третьем знаке после запятой, но Рэлей и Рэмзэй были настолько уверены в точности этих измерений, что с уверенностью сказали: в атмосферном азоте должна быть какая-то примесь, какой-то газ более тяжелый, чем азот. Основываясь на этом предсказании, Рэлей и Рэмзэй сумели открыть в атмосферном воздухе аргон. Поэтому открытие аргона было названо «победой третьего знака после запятой». Таким же точно образом то блестящее открытие, историю которого мы сейчас расскажем, могло бы быть названо «победой четвертого знака после запятой». Сопоставляя оба эти выражения, мы можем получить представление о том прогрессе измерительного искусства, который произошел за сорок лет, отделяющих открытие аргона от открытия тяжелого изотопа водорода.

Если сделать предположение, что изотоп «водород два» (а не например, «водород три») является тем тяжелым изотопом водорода, присутствие которого делает средний атомный вес водорода больше, чем вес обыкновенного водородного атома, то из указанных нами чисел легко рассчитать, что в обыкновен-

ном водороде примерно один атом на несколько тысяч должен обладать необычным (двойным) атомным весом. Пользуясь этим указанием Берджа и Менделя, три американских физика — Юрей, Брикведде и Мерфи — стали искать тяжелый изотоп водорода. В начале 1932 года они сделали попытку обогащения водорода тяжелым изотопом. Для этого они взяли большое количество твердого водорода (при соответствующей очень низкой температуре) и стали медленно испарять его под очень низким давлением. Оставшуюся небольшую порцию они подвергли спектроскопическому исследованию: ведь в этой оставшейся порции процент «тяжелого» водорода должен был быть больше, чем обычный, потому что при испарении, как мы уже говорили, легкий изотоп уходит охотнее, чем тяжелый. Торжество было полное: наряду со спектральными линиями, принадлежащими обыкновенному водороду, в спектре были очень слабенькие линии, которые можно было объяснить только приписав их тяжелому изотопу «водород два». Насколько эти линии были слабы, можно судить хотя бы из того факта, что для фотографирования их нужно было выдерживать фотографическую пластинку в четыре тысячи раз дольше, чем для фотографирования обыкновенного спектра водорода.

Открытие тяжелого изотопа водорода представляло интерес прежде всего в том отношении, что здесь впервые физики столкнулись с таким случаем, когда вес одного изотопа в два раза превышает вес другого. Обыкновенно отличие в атомном весе бывает не больше нескольких процентов, и этим объясняются те огромные трудности, которые встречаются при всех попытках отделить изотопы друг от друга: изотопы почти не отличаются друг от друга по своим свойствам. Но здесь было совершенно иное дело: можно было надеяться, что огромное различие в весе между тяжелым и легким изотопом водорода приводит к тому, что их свойства, несмотря на одинаковый заряд ядра, не очень одинаковы, и поэтому их

будет не так трудно разлучить. Так и оказалось. Сперва американцы Юрей и Уошберн обнаружили, что вода содержащаяся в ванночках, долго служивших для электролиза, богаче тяжелым изотопом водорода, чем обыкновенная вода. Выходит, что и при электролизе, а не только при испарении твердого водорода, атом тяжелого изотопа ведет себя не так, как обыкновенный атом водорода. Ион тяжелого изотопа водорода менее подвижен при электролизе, а потому из электролита легкие атомы водорода («водород один») удаляются легче, чем тяжелые атомы («водород два»).

Известный американский химик Г. Н. Льюис решил воспользоваться открытием Юрея и Уошберна для того, чтобы произвести разделение изотопов водорода в большом масштабе. Вместе со своим сотрудником Макдональдом Льюис приготовил в лаборатории Калифорнийского университета почти чистую «тяжелую воду». Способ, который они применили, был электролиз. При электролизе кислот происходило обогащение остающейся воды тяжелым изотопом водорода. Этот процесс повторялся много раз. После нескольких недель работы Льюис и Макдональд уже имели в своем распоряжении несколько граммов драгоценного нового вещества — воды, в которой почти все молекулы содержали исключительно тяжелую разновидность водорода, т. е.  $H^2$ , а не  $H^1$  (значком вверх мы обозначаем, как делали это и раньше, атомный вес). В обычных единицах атомного веса вес молекулы «тяжелой воды»  $(H^2)_2O$  равен не 18, как вес молекулы обычной воды, а 20.

Уже та вода, которую Уошберн и Юрей нашли в старых электролитических ваннах, была не совсем похожа на обыкновенную воду. Она имела немножко бóльшую плотность (т. е. кубический сантиметр такой воды весил больше, чем кубический сантиметр обыкновенной воды при той же самой температуре), она меньше преломляла свет, чем обыкновенная вода, кипела и замерзала при более высоких температурах и имела множество других отличий от обыкновенной воды. Но

все же это была еще не чистая «тяжелая вода», а только вода с немного повышенным, против нормы, содержанием тяжелого изотопа. А вода, полученная Льюисом и Макдональдом, отличалась от обыкновенной воды еще больше. Каждый кубический сантиметр тяжелой воды Льюиса и Макдональда весил на 11% больше, чем кубический сантиметр обыкновенной воды. Обыкновенная вода замерзает при  $0^{\circ}$ , кипит при  $100^{\circ}$ . Тяжелая вода, которую получили Льюис и Макдональд, замерзала при  $3^{\circ},8$ , кипела при  $101^{\circ},42$  С. Обыкновенная вода становится всего плотнее при  $4^{\circ}$  С. Тяжелая вода, приготовленная в лаборатории Льюиса, становилась наиболее плотной при  $11^{\circ},6$  С.

Но всего любопытнее и неожиданнее оказались биологические свойства тяжелой воды. Как только Льюис, продолжая свою работу, получил достаточно большое количество тяжелой воды (несколько сот кубических сантиметров), он стал снабжать ею своих товарищей по Калифорнийскому университету для производства всевозможных опытов. Некоторое количество тяжелой воды получили от него и биологи. Обыкновенная вода, как всем известно, играет большую роль во всех жизненных явлениях. Как изменятся явления жизни, если вместо обыкновенной воды взять тяжелую воду  $(\text{H}^2)_2\text{O}$ ? Биологи, которые произвели опыты с тяжелой водой сразу же заметили, что она и в этом отношении не похожа на обыкновенную. Тяжелая вода напоминает ту «мертвую воду», о которой говорится в старинных сказках. В ней не прорастают семена, в ней погибают микробы, а также и высшие пресноводные организмы — плоские черви, головастики и рыбы. Выходит, что тяжелая вода является ядом для животных и растений<sup>1</sup>. И этот яд содержится в обыкновенной воде в ко-

<sup>1</sup> Впрочем, тяжелая вода ядовита не так уж сильно. 25 января 1935 года норвежский физиолог Клаус Хансен выпил для опыта 10 г тяжелой воды, и ничего дурного с ним не произошло. Других опытов над действием тяжелой воды на организм человека пока еще никто не делал.

личестве одной молекулы на каждые несколько тысяч, т. е. в количестве нескольких сотых долей процента, а все химики, изучавшие воду в течение столетий, ежедневно пользовавшиеся ею во всех своих анализах, не замечали этого до 1932 года!

Не следует удивляться тому, что «тяжелая вода» оказалась ядовитой. Этого даже следовало ожидать. Все физические и химические свойства тяжелой воды, в общем, не очень сильно отличаются от свойств обыкновенной воды. Если мы удивляемся этим отличиям, то только потому, что к свойствам обыкновенной воды мы уж очень сильно привыкли. Мы еще в школе заучиваем, что вода замерзает при  $0^{\circ}$ , кипит при  $100^{\circ}$ , а наибольшую плотность имеет при  $4^{\circ}$  С. Естественно, что мы удивляемся, когда нам говорят, что существует такой сорт воды, у которой все эти характерные для нее температуры нужно переделать на несколько градусов. Но все же это всего лишь несколько градусов, а не несколько десятков градусов. Значит отличия тяжелой воды от обыкновенной не так уж велики. И только по своим биологическим свойствам тяжелая вода отличается от обыкновенной очень сильно. Почему?

Это объясняется тем, что в живом организме все очень уж точно пригнано, приложено и уравновешено. Достаточно немного изменить состав крови, как организм заболевает (вспомним, например, о тех расстройствах жизнедеятельности организма, которые происходят при ослаблении или чрезмерном усилении работы желез внутренней секреции, выбрасывающих в кровь небольшие количества химических продуктов — гормонов). То же самое происходит при небольшом изменении состава желудочного сока, лимфы и т. д.

Атомы тяжелого изотопа водорода оказываются столь коварными именно потому, что они так похожи по своим химическим свойствам на обыкновенные атомы водорода. Организм животного или растения очень энергично обменивается



атомами с окружающей средой. Если в окружающей среде (например в поглощаемой организмом воде) есть очень большой процент атомов тяжелого изотопа водорода, то эти атомы входят в организм животного или растения по той же самой дороге, по какой входили бы атомы обыкновенного водорода. Они вступают в такие же самые химические реакции, соединяются с теми же веществами, внедряются в состав тех же самых тканей организма. Вследствие энергичного обмена веществ с окружающей средой в организме очень быстро устанавливается такой же самый процент атомов тяжелого водорода (по сравнению с общим количеством водорода), какой есть в окружающей среде.

А так как в организме все уж очень точно пригнано и прилажено, то для его жизнедеятельности совсем не все равно, сидят ли атомы обыкновенного водорода или атомы тяжелого изотопа водорода в молекулах тех веществ, из которых строятся клетки и ткани организма. Изменение того отношения между количеством атомов легкого и тяжелого водорода, которое существовало раньше, оказывается роковым для организма. Тонко рассчитанное равновесие нарушается, и организм погибает. Вот почему тяжелая вода оказывается ядом. Короче говоря, она ядовита именно потому, что ее отличия от обыкновенной воды сравнительно невелики.

Заметим, с другой стороны, что при обыкновенных жизненных явлениях количество тяжелого изотопа водорода, существующее в организме, не может очень заметно повышаться. Ведь мы говорили о том, что очень быстро достигается равновесие между организмом и окружающей средой (в смысле процентного содержания тяжелого изотопа водорода). Вот почему высказанное некоторыми врачами мнение, что в течение жизни животного или человека количество атомов тяжелого водорода в его теле все время увеличивается и что это чуть ли не служит причиной наступления старости — это мнение ошибочно.

Ошибочно также утверждение, часто высказываемое в газетах, что в некоторых естественных водоемах (озерах и т. п.) имеется резко увеличенное по сравнению с обычным количество молекул «тяжелой воды». Хотя правда, что скорость испарения молекул тяжелой воды и легкой воды неодинакова и это могло бы привести к повышению процента молекул «тяжелой воды» в закрытых водоемах, в которых происходит долгое испарение, тем не менее различие в скорости испарения слишком невелико для того, чтобы оно привело к очень заметным результатам. (Ведь вес молекулы тяжелой воды всего лишь на 11% больше веса молекулы обыкновенной воды. Даже в опытах Юрея, Брикведде и Мерфи, которые подвергали испарению замерзший водород, не удалось получить очень большого процента атомов тяжелого изотопа. А между тем там вес испарявшейся тяжелой молекулы был на 100%, а не на 11% больше, чем вес испарявшейся легкой молекулы). Опыты показали, что в воде Мертвого моря, где как раз заведомо происходило это явление очень длительного выпаривания, нет сколько-нибудь заметного увеличения процентного содержания тяжелого изотопа.

Успех Льюиса и Макдональда в получении больших (сравнительно) количеств тяжелой воды вызвал чрезвычайный интерес к тяжелой воде и среди физиков и среди широкой публики. Газеты стали писать о том, что «тяжелая вода» — это самый сильный яд на свете. Это несомненное «преувеличение». Не может быть самым сильным ядом на свете вещество, которое присутствует в количестве почти двухсот миллиграммов в каждом литре воды, которую мы пьем. Вряд ли также можно думать, что тяжелая вода получит применение в будущей химической войне.

Самую чистую тяжелую воду на свете (или точнее говоря самый чистый тяжелый водород) приготовил немецкий физик Гертц. Он пользовался не способом Льюиса-Макдональда, а «способом диффузии» — тем самым способом, которым

в 1913 году Астону удалось произвести частичное разделение изотопов неона. Герцц получил, пользуясь этим способом, тяжелый водород до такой степени свободный от всяких остатков обыкновенного легкого водорода, что в спектре полученного им водорода были уже только спектральные линии тяжелого водорода. Спектральных линий легкого водорода там никак нельзя было обнаружить.

По наиболее точным теперешним измерениям в обыкновенной воде имеется один атом тяжелого водорода на шесть с половиной тысяч атомов легкого.

Исследуя тяжелую воду, полученную по способу Льюиса, некоторые физики обнаружили в ней присутствие молекул с атомами «сверхтяжелого» водорода, т. е. изотопа водорода с атомным весом три. В обыкновенной воде количество атомов «сверхтяжелого» водорода еще гораздо меньше, чем атомов «тяжелого» водорода: один атом «водорода три» приходится в ней чуть ли не на миллиард атомов обыкновенного «водорода один».

С весны 1934 года химические заводы Монда в Англии («Импиреэл Кемикэл Индэстри») стали изготавливать тяжелую воду в больших заводских масштабах. У нас в СССР добыча тяжелой воды налажена (по способу Льюиса-Макдональда) в Днепропетровске.

Нет никакого сомнения в том, что открытие тяжелой воды и дешевых способов ее добывания окажется необыкновенно полезным на практике. Возникнет целая новая органическая химия, которая будет изучать вещества, отличающиеся от обычных органических веществ тем, что вместо атомов легкого водорода в их молекулах сидят атомы тяжелого водорода. Эти новые вещества будут чем-то отличаться по своим свойствам от обычных, а значит некоторые из них случайно окажутся полезнее для какой-нибудь практической цели, чем соответствующие им обычные вещества.

Очень много споров вызвал вопрос о названиях и химиче-

ских обозначениях. Американцы предложили назвать тяжелый водород «дейтериум», а ядро атома тяжелого водорода «дейтон» (в отличие от протона — атомного ядра обыкновенного водорода). Резерфорд предложил назвать тяжелый водород «диплоген», а ядро атома диплогена — «диплон». Эти предложенные Резерфордом названия, вероятно, войдут во всеобщее употребление. Он же предложил обозначать атом тяжелого водорода буквой D, оставив букву H в исключительное пользование обыкновенному водороду. Таким образом химическая формула «тяжелой воды» будет  $D_2O$ .

## Глава седьмая

### ШТУРМ АТОМНОГО ЯДРА

Радиоактивные превращения с одной стороны и целые атомные веса изотопов с другой стороны доказывают, что атомные ядра не являются последними неразрушимыми кирпичиками мироздания. Атомные ядра должны оказаться сложными системами, состоящими из более простых составных частей. Значит принципиально возможно разрушать атомные ядра, отрывая от них те или иные части и тем самым — так как ядро есть носитель химической индивидуальности атома — превращать одни химические элементы в другие.

Превращение химических элементов — вот задача, которую поставила себе еще средневековая химия и которая никогда не переставала возбуждать воображение химиков, несмотря на то, что атомная теория Дальтона объявила решение этой задачи невозможным. В XIX веке, в то время, когда теория Дальтона господствовала, казалось, совершенно нераздельно, гениальный английский ученый Михаил Фарадей, говоря о средневековых искателях «философского камня», способного превращать неблагородные металлы в золото, воскликнул: «Вот истинная задача научной химии!» Открытие радиоактивности, истинный смысл которого был разъяснен Резерфордом и Содди, показало, что химические элементы на самом деле могут превращаться друг в друга. Но средневековым алхимикам, искателям философского камня, открытие радиоактивности показалось бы злой шуткой: ведь они жела-

ли научиться управлять превращением элементов, вызывать это превращение, а радиоактивные явления, как мы знаем, происходят сами собой, независимо от участия экспериментатора. Неудача всех попыток физиков так или иначе повлиять на быстроту распада радиоактивных элементов показала, что явления, происходящие с ядрами атомов, вызываются действием сил, по сравнению с которыми кажутся совершенно жалкими все силы, до сих пор бывшие в распоряжении людей: огромные энергии, огромные давления, развиваемые при взрыве самых сильных взрывчатых веществ и разносящие вдребезги каменные скалы, оказались неспособными повлиять на быстроту распада ядер. Где же взять тот «сильный и тонкий агент», который смог бы разрывать на части атомные ядра?

Резерфорду пришла в голову замечательная мысль — использовать для разрушения атомных ядер, не желающих распадаться самопроизвольно, те силы, которые развиваются при самопроизвольном распаде других ядер — ядер радиоактивных атомов. Альфа-частицы, испускаемые радием  $C'$ , одним из продуктов распада радия, летят со скоростью 19220 км/сек. Эта скорость мала по сравнению с той, с которой летят нередко электроны, вырывающиеся из радиоактивных ядер, но если вспомнить, что зато альфа-частица почти в семь с половиной тысяч раз тяжелее электрона и вместе с тем обладает размерами ничтожными по сравнению с размерами атомов, то придется признать, что в альфа-частицах мы имеем дело с величайшими концентрациями энергии в чрезвычайно малом пространстве. Альфа-частицы радия  $C'$  и были тем могучим тараном, которым Резерфорд ударил в неприступные ворота нерадиоактивных атомов. И ворота распахнулись!

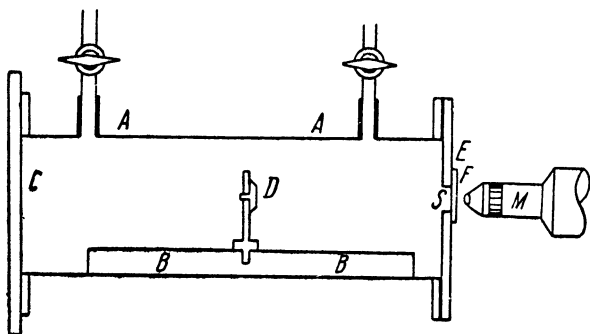
История этого замечательного открытия такова: еще в 1907 году Рэмзэй и Кэмерон пробовали осуществить искусственное превращение элементов, подбавляя к исследуемому элементу немного радона и тем самым подвергая его дей-

ствию альфа-частиц радона и его продуктов распада (радия А и радия С и С'). В том, что при этом превращение элементов действительно происходило, Рэмзэй и Кэмерон пробовали убеждаться химическим анализом. Они утверждали, что в воде, подвергнутой действию альфа-частиц, появляется небольшое количество неона и аргона, а в меди появляются еле заметные следы лития. Но эти опыты Рэмзэя и Кэмерона оказались ошибочными: точное химическое исследование выяснило, что обнаруженные ими химические элементы, якобы возникшие из тех веществ, которые подвергались обстрелу альфа-лучей, в действительности существовали и до начала опыта в виде небольших примесей к исследуемым веществам (к воде или меди). Рэмзэю несколько раз казалось, что он открыл искусственное превращение элементов, результаты которого могут быть обнаружены химическим путем, но каждый раз оказывалось, что это — ошибка. И такой замечательный химик, как Рэмзэй, не мог, разумеется, очень долго настаивать на этих ошибках: через некоторое время он сам брал обратно свои утверждения.

Успешный опыт с искусственным превращением элементов был впервые осуществлен сэром Эрнестом Резерфордом в Кэвэндишевской лаборатории в 1919 году. Всего лучше будет, если об этом величайшем физическом открытии мы расскажем словами самого Резерфорда (чертежи и цитаты взяты из его книги «Лучи радиоактивных веществ»).

«Опыты были очень просты и вместе с тем очень чувствительны. Применявшийся в этих опытах прибор изображен на рисунке. Альфа-частицы, испускаемые активным осадком (продуктами распада радия), находящимся в точке D, поглощались в газе, которым был наполнен прибор. Отверстие S в крышке ящика было закрыто серебряным листком, а за этим отверстием снаружи находился экран из сернистого цинка. Если газом, через который проходили альфа-частицы, был азот, то на экране происходили вспышки даже тогда, когда

слой газа между источником альфа-лучей и экраном был вполне достаточен для того, чтобы целиком поглотить все альфа-частицы. При замене же азота кислородом или углекислым газом вспышки прекращались. Отсюда я заключил, что все вспышки вызывались частицами, которые вылетали с большой скоростью из атомных ядер азота при столкновении



Прибор Резерфорда для наблюдения расщепления ядер азота альфа-частицами.

этих ядер с альфа-частицами. Выбиваемые из азотных ядер частицы имели такую скорость, что они могли бы пробежать в атмосферном воздухе путь в 28 см. Измерения отклонения этих частиц магнитным полем показали, что это протоны — атомные ядра водорода. Я сумел доказать, что выбивание водородных ядер альфа-частицами объяснялось совсем не тем, что в исследуемом газе заранее была примесь водяного пара или водорода.

Эти опыты были первым доказательством возможности искусственного расщепления атомных ядер. Орудием расщепления были альфа-частицы радия  $C'$ , а в результате расщепления получался протон — водородное ядро, выбрасываемое с большой скоростью из азотного ядра. Число разрушенных



ядер азота было чрезвычайно мало. Количество водорода, получаемое из азота в результате применения тех количеств радиоактивных веществ, какие находятся в распоряжении экспериментатора, настолько невелико, что химические способы анализа бессильны обнаружить этот водород. Я подсчитал, что из миллиона альфа-частиц, проходивших через азот, приблизительно только одна могла выбить из азотного ядра протон. Это показывает, что необходимо очень удачное столкновение и очень редкое благоприятное стечение обстоятельств, чтобы альфа-частица могла выбить из азотного ядра ядро водорода».

Сравнивая удачный опыт Резерфорда с прежними неудачными попытками Рэмзэя, мы можем сказать, что причина неудач Рэмзэя заключалась именно в том, что он пробовал применять для обнаружения продуктов искусственного распада химический анализ. Но распад производят не все альфа-частицы, а только очень немногие (в опытах Резерфорда всего лишь несколько альфа-частиц на миллион). Поэтому то количество азота, которое удастся «превратить в водород» чрезвычайно невелико, так что никакие химические способы анализа тут не годятся. Успех Резерфорда объясняется тем, что он оставил попытки химического анализа, а применил подсчет отдельных атомов с помощью флюоресцирующего экрана, т. е. применил тот же самый способ, на котором основан спинтарископ Крукса.

Успех описанного опыта Резерфорда основан еще на том обстоятельстве, что протоны, выбрасываемые ядром азота при столкновении его с альфа-частицей, имеют очень большую скорость. Если бы они имели гораздо меньшую скорость, то они не смогли бы дойти до флюоресцирующего экрана: они поглотились бы в самом азоте, растратив всю свою скорость на столкновения с атомами азота. Поэтому для того, чтобы протоны доходили до экрана, пришлось бы значительно ближе придвигать экран из сернистого цинка к источ-

нику альфа-лучей. Но при этом получилась бы новая неприятность: на экран попадали бы не только протоны, но и сами альфа-частицы. А поэтому никак не удавалось бы отличить вспышки, вызванные падением протонов на экран, от вспышек, вызванных падением альфа-частиц. И нельзя было бы с уверенностью утверждать, что протоны действительно выбиваются из азотных ядер.

Поэтому описанный выше прибор Резерфорда пригоден для обнаружения искусственного расщепления ядер только в тех случаях, когда протоны вылетают очень быстрые. Только в этих случаях имеет смысл ставить экран так далеко от источника, чтобы сами альфа-частицы туда уж никак не могли залетать, а могли залетать только протоны, имеющие заметно бóльшую «длину пробега», чем альфа-частицы. Пользуясь этим своим прибором, Резерфорд сумел обнаружить расщепление альфа-частицами не только ядер азота, но и ядер других элементов, а именно бора, фтора, натрия, алюминия и фосфора. Во всех других случаях, чем бы ни наполнялась камера прибора, экран, поставленный настолько далеко, что альфа-частицы туда залетать не могли, не показывал вспышек.

Но что если протоны выбиваются и из ядер других элементов, но только выбиваются с небольшими (сравнительно) скоростями, так что они не могут попасть на экран, отодвинутый так, чтобы туда не могли попадать альфа-частицы? Как обнаружить эти протоны, вылетающие с небольшими скоростями?

И Резерфорду пришла в голову остроумная идея: расположить экран не так, как нарисовано на стр. 267, т. е. не так, чтобы туда попадали протоны, вылетающие из ядра, в том же самом направлении, куда летят и альфа-частицы, а так, чтобы туда попадали протоны, вылетающие под прямым углом к направлению полета альфа-частиц. Будут ли вспышки наблюдаться тогда? Резерфорд сначала испробовал эту идею на том

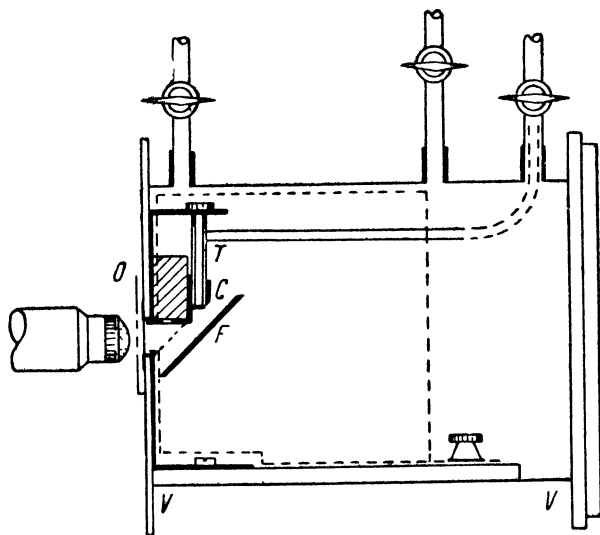
же самом азоте. Оказалось, что вспышки на самом деле происходят. А это значит, что протоны испускаются ядрами азота не только в том направлении, куда летит выбившая их альфа-частица, а решительно по всем возможным направлениям — и вперед, и назад, и в сторону. Поэтому, если поставить экран не впереди, прямо под обстрелом альфа-частиц, а сбоку, то и туда будут попадать протоны, а сами альфа-частицы попадать туда не будут<sup>1</sup>, а также не будут попадать и водородные ядра, выбитые альфа-частицами из примеси водорода, если он даже случайно окажется в исследуемом газе: быстрые водородные ядра, выбиваемые из молекул примеси, всегда летят вперед по направлению выбившей их альфа-частицы, подобно тому как бильярдный шар, стоявший на бильярде неподвижно, начинает после «лобового» удара двигаться вперед по направлению движения ударившего его «в лоб» другого шара. Такой экран, поставленный под прямым углом к пучку альфа-лучей, проходящих через исследуемое вещество, можно поместить, следовательно, даже и очень близко к пучку, не боясь того, что туда будут попадать альфа-частицы и водородные ядра из водородных примесей. Все частицы, которые попадут на экран, поставленный под углом, должны обязательно быть частицами, выбитыми из ядер.

Опыты, произведенные Резерфордом и его учеником Чэдвиком по такому «способу прямого угла», действительно показали, что протоны с небольшой длиной пробега выбрасываются альфа-частицами из ядер неона, магния, кремния, серы, хлора, аргона и калия. Значит и эти элементы претерпевают искусственное превращение под обстрелом альфа-частиц. Вот полный список химических элементов, атомные ядра которых были расщеплены альфа-частицами: бор, азот, фтор, неон,

---

<sup>1</sup> Можно было бы подумать, что на такой экран будут попадать альфа-частицы, рассеиваемые атомами на очень большие углы (ср. гл. V). Но вычисление показало, что число таких альфа-частиц в этих опытах настолько ничтожно, что ими свободно можно пренебречь.

натрий, магний, алюминий, кремний, фосфор, сера, хлор, аргон, калий. Итого тринадцать элементов. Если взглянуть на периодическую таблицу, то окажется, что это — все элементы от бора до калия включительно, за исключением углерода и кислорода. Таков результат пятилетней работы Резерфорда и Чэдвика (1919—1924 г.).

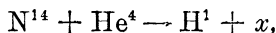


Прибор Резерфорда и Чэдвика для наблюдения расщепления ядер альфа-частицами по „способу прямого угла“.

Как происходит это искусственное расщепление? Каковы продукты искусственного распада? Наблюдая, как протоны выбиваются из ядер азота и других элементов по всем направлениям, Резерфорд составил себе такую наглядную картину всего явления: альфа-частица входит в ядро атома, который подвергается расщеплению, и как бы соединяется с этим ядром. Но то ядро, которое при этом получается, необыкновенно неустойчиво, и оно сейчас же распадается, испуская при

этом протон. Попробуем описать эту ядерную реакцию простой и короткой формулой, похожей на те, которыми химики описывают свои химические реакции.

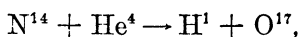
В реакции принимают участие два ядра: атомное ядро элемента, подвергнутого обстрелу, и альфа-частица. Для удобства мы будем, как это мы уже делали раньше, писать атомный вес ядра в виде целого числа, расположенного после значка элемента наверху. Тогда альфа-частица изобразится в виде  $\text{He}^4$  (ядро гелия с атомным весом четыре). Если обстреливаемый элемент есть азот, то второе ядро, которое принимает участие в реакции, есть  $\text{N}^{14}$ . Итак до реакции имеем  $\text{N}^{14}$  и  $\text{He}^4$ . После реакции получается протон и еще какое-то другое ядро, и мы сейчас узнаем посредством простого вычисления, какое именно. Протон можно обозначить значком  $\text{H}^1$  (ядро водорода с атомным весом единица). Значит реакция будет иметь такой вид:



где  $x$  — это второй продукт распада, который мы обозначим буквой  $x$ , как неизвестную величину в алгебраической задаче. Что же это за продукт?

Его атомный вес определить просто: очевидно он равен 17, потому что слева сумма весов есть  $14 + 4 = 18$ , а значит нужно, чтобы и справа была та же сумма  $18 = 1 + 17$ . Ведь точные веса ядер, которые выражаются целыми числами с дробью, могут, как показал Эйнштейн (см. предыдущую главу), не в точности сохраняться, вследствие того, что выделяемая или поглощаемая энергия обладает весом. Но приближенные целые атомные веса, конечно, сохраняются. Итак, атомный вес мы уже определили. Но как определить порядковый номер? Это тоже проще простого. Ведь полный заряд тоже сохраняется: протоны и электроны как-то перегруппируются, но сумма их зарядов остается неизменной. Но у азота  $Z = 7$ , у гелия  $Z = 2$ . Значит слева сумма равна 9. Справа

один член суммы равен единице (у водорода  $Z=1$ ). Значит другой должен равняться 8. Смотрим в список химических элементов и находим, что на восьмом месте стоит кислород. Поэтому окончательно формула реакции имеет вид



т. е. в результате получается атом водорода и атом изотопа кислорода с атомным весом 17.

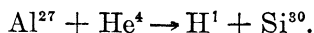
Мы предлагаем читателю самому решить подобную же задачу: что получается при выбивании альфа-частицей протона из алюминия ( $\text{Al}^{27}$ ). Вычисления располагаются следующим образом: для атомных весов имеем равенство

$$27 + 4 - 1 = 30;$$

для атомных номеров (числа  $Z$ ) в свою очередь имеем:

$$13 + 2 - 1 = 14,$$

ибо для Al, He и H числа  $Z$  равны соответственно 13, 2, 1. Замечая, что  $Z=14$  соответствует элементу кремнию (Si), мы можем записать нашу реакцию так:



Получается атом водорода и атом изотопа кремния с атомным весом 30.

Таковы первые химические, или лучше сказать «алхимические» формулы искусственного превращения элементов, осуществленного физикой XX столетия.

Наиболее подробное исследование искусственного расщепления ядер альфа-частицами может быть сделано с помощью камеры Вильсона. Ведь в камере Вильсона можно чуть ли не «видеть» атомные ядра и все, что с ними происходит.

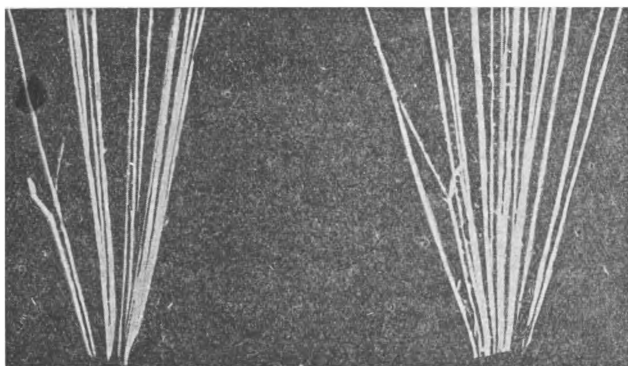
За эту задачу взялся ученик Резерфорда Блэккетт. О его опытах с камерой Вильсона мы уже упоминали в главе V. Теперь расскажем о них подробнее. Цель этих опытов за-

ключалась в том, чтобы наблюдать в камере Вильсона расщепление атомных ядер. Но главная трудность была та, что расщепление ядер альфа-частицами — это необычайно редкое явление: из своих первых опытов с расщеплением Резерфорд заключил, что из миллиона альфа-частиц, проходящих через азот, только одна сшибается с ядром азота так удачно, что получается расщепление. Это была довольно грубая оценка: позднейшие, более точные опыты показали, что на миллион альфа-частиц получается до двадцати протонов, выбитых из ядер азота. Но это только немногим лучше: выходит, что нужно сфотографировать пятьдесят тысяч трэков (путей) альфа-частиц в азоте, чтобы наблюдать одно расщепление. Но Блэккетт все же решился на этот огромный труд. Его камера Вильсона была устроена так, что можно было производить съемку каждые 10 — 15 сек. Камера была наполнена азотом с небольшой примесью кислорода (опыт показал, что примесь кислорода почему-то полезна для того, чтобы получались более резкие, более отчетливые трэки). Блэккетт снял 23 тысячи фотографий; в среднем на каждой фотографии было около 18 трэков альфа-частиц. Фотографии снимались стереоскопические, и затем, производя точные расчеты, основанные на законах механики, Блэккетт мог судить о том, какие были скорости и энергии у частиц, получившихся в результате столкновения.

Некоторые из его фотографий здесь приводятся. (Заметим, что из заснятых четырехсот тысяч путей альфа-частиц только восемь штук оказались такими, что по ним можно было заключить о происшедшем расщеплении азотного ядра). На этих фотографиях ясно видны тонкие пути, принадлежащие выбитым протонам, и короткие толстые пути, принадлежащие второму продукту распада — ядру «кислорода семнадцать». Других путей нет, и значит прав был Резерфорд, предположивший, что альфа-частицы при таком столкновении поглощаются ядром. Если бы альфа-частица, выбивая из азотного

ядра протон, сама оставалась при этом незахваченной ядром, то был бы виден и третий путь — путь улетающей альфа-частицы.

По длине пробега выбитых из ядра протонов можно определить их энергию. Оказалось, что альфа-частицы радия  $C'$ ,



Одна из фотографий Блэккетта, показывающая расщепление азота альфа-частицами.

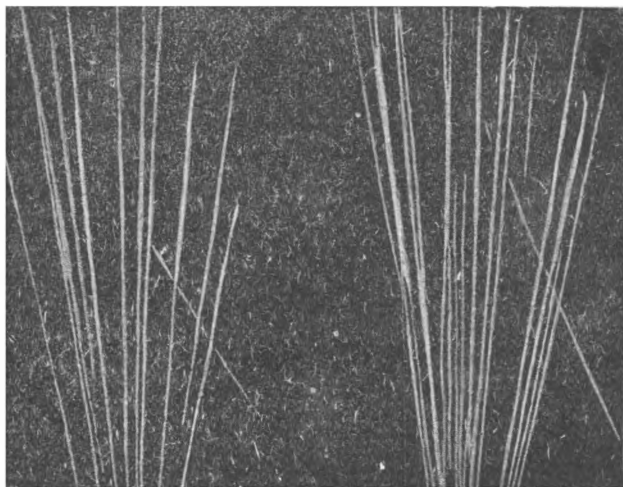
Снимок двойной, пригодный для рассматривания в стереоскоп (обойми глаза. и). На снимке видно, как путь альфа-частицы при столкновении с ядром азота разветвляется одна из ветвей (гонка и длинная) принадлежит выбитому из азотного ядра протону, другая — образовавшемуся ядру изотопа кислорода ( $O^{17}$ ). Отсутствие третьей ветви показывает, что расщепление происходит с захватом альфа-частицы.

имевшие в воздухе длину пробега 6,9 см, выбивают из ядер азота протоны с длиной пробега 40 см, а из алюминия протоны с наибольшей длиной пробега — 90 см, в атмосферном воздухе. Каков же баланс энергии при этих превращениях?

Для того чтобы привести численные данные о величине энергии, выделяемой или поглощаемой в ядерных реакциях, необходимо условиться о том, какой единицей мы будем измерять энергию. Мы уже имели единицу для измерения энергии, а именно калорию: то количество энергии, которое нужно затратить, чтобы на один градус Цельсия нагреть один грамм воды. Но для измерения энергии, которая выде-



ляется или поглощается в процессах, происходящих с отдельными атомами или отдельными ядрами, физики никогда не пользуются этой единицей. Они пользуются другой, а именно единицей, которая называется «электрон-вольт» (и обозначается просто буквой V). Электрон-вольт — это то количество энергии, которое приобретает электрон, разогнанный



Фотография Блэккетта, показывающая расщепление азота альфа-частицами. Выбитый протон летит назад.

электрическим полем с напряжением в один вольт. (Заметим, что протон, разогнанный электрическим полем в один вольт, приобретает такое же самое количество энергии, потому что ведь заряд протона ничем, кроме знака, не отличается от заряда электрона). Для того, чтобы переводить одну из этих единиц в другую, необходимо заметить, что 1 калория равна  $2,64 \cdot 10^{19}$  электрон-вольт. Вычислим, например, теплоту, выделяющуюся при образовании одной молекулы углекислого газа из одного атома углерода и двух атомов кислорода. Известно, что грамм угля,

сгорая, дает 8000 калорий тепла. Но каждый атом углерода весит  $12 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} = 2 \cdot 10^{-23}$  гр. Значит в грамме угля содержится  $5 \cdot 10^{22}$  атомов углерода. На каждый из них приходится, следовательно,  $1,6 \cdot 10^{-19}$  кал.  $= 4,2$  V выделяемой энергии. Таков обычный порядок энергий, с которыми приходится иметь дело в химических реакциях: несколько электрон-вольт выигрыша или несколько электрон-вольт проигрыша энергии — таков почти всегда энергетический баланс химических реакций. Но из длин пробегов частиц, принимающих участие в ядерных реакциях, можно вычислить энергию этих частиц, и там уже мы встречаемся с совершенно иными цифрами. Альфа-частица, выбрасываемая радием C', имеет энергию 7,7 миллионов электрон-вольт. Когда она производит расщепление ядра азота, то при этом получается протон, летящий с энергией движения в 6,15 миллионов электрон-вольт, и ядро «кислорода семнадцать» с энергией 0,38 миллионов электрон-вольт. Значит при расщеплении ядра азота мы имеем проигрыш энергии: затрачено 7,7 миллионов, а получено 6,5 миллионов, итого проигрыш 1,2 миллиона электрон-вольт. При разрушении же ядра алюминия той же альфа-частицей получается протон с энергией 10,4 миллиона электрон-вольт и ядро «кремний тридцать» с энергией 0,3 миллиона электрон-вольт. Значит затрачено 7,7 миллионов, а получено 10,7 миллионов электрон-вольт. Выигрыш энергии равен трем миллионам электрон-вольт: вот что происходит при расщеплении одного ядра алюминия. Этот выигрыш превосходит в семьсот тысяч раз ту энергию, которую мы получаем от одного атома угля при образовании углекислого газа.

Такой громадный энергетический выигрыш, полученный при ядерных реакциях, наводит на следующую мысль: нельзя ли использовать энергию ядерных реакций в технике? Зачем мы сжигаем в топках паровых котлов уголь? Нельзя ли заменить его гораздо более мощным источником энергии — алю-

минием, находящимся под обстрелом альфа-частиц? Это в самом деле заманчивая идея, но все же это не так-то просто. Ведь не все альфа-частицы, которыми мы обстреливаем алюминий, производят расщепление ядер. Из каждого миллиона альфа-частиц, попадающих на алюминий, только восемь вызывают расщепление ядер и дают, поэтому, интересующий нас выигрыш энергии. Остальные 999 992 альфа-частиц тратятся совершенно впустую. Поэтому в окончательном результате никакого выигрыша не получается.

Задача использования энергии ядерных реакций в технических целях оказывается таким образом весьма трудной для решения. Возможно, что когда-нибудь удастся открыть такую ядерную реакцию, продукты которой обладают достаточно большой энергией для того, чтобы в свою очередь произвести много дальнейших расщеплений, причем продукты этих расщеплений тоже произведут новые и новые расщепления и т. д. и т. д. Такая ядерная реакция пойдет «сама собой», как распространяется взрыв, а поэтому удастся получить вполне заметный, или может быть, даже огромный выигрыш энергии. Но к сожалению такая ядерная реакция еще не открыта (а может быть и к счастью, потому что шутить с таким огромным количеством энергии, может быть, и небезопасно).<sup>1</sup>

Успешные опыты Резерфорда, добившегося искусственного превращения элементов с помощью альфа-частиц, испускаемых радиоактивными элементами, подтвердили предположе-

---

<sup>1</sup> Говоря об энергии, которая должна выделяться при превращении водорода в гелий, Астон делает следующее замечание: «Если когда-нибудь будущие исследователи найдут способ освобождать эту энергию в удобной для эксплуатации форме, то человечество получит в свое распоряжение силы, превосходящие самую смелую научную фантазию. Но, как ни далека эта возможность, все же нужно предвидеть, что освобожденная энергия может оказаться недоступной контролю и своей огромной силой взорвет все окружающие вещества. В таком случае весь водород земного шара сразу подвергнется превращению в гелий, и успех эксперимента будет опубликован во вселенной вновь появившейся звездой».

ние о том, что ядра всех (даже и не радиоактивных) элементов являются сложными системами, содержащими протоны. Однако альфа-частицы в качестве снарядов для расщепления ядер обладают многими неудобствами. В распоряжении исследователя не часто бывают препараты, содержащие больше нескольких дециграмм радия, да и то из всех альфа-частиц, испускаемых препаратом, экспериментатор обыкновенно может использовать только небольшую часть, потому что ведь альфа-частицы разлетаются по всем направлениям, а не летят концентрированным пучком. В результате этого интенсивность потоков альфа-частиц, применяемых для бомбардировки ядер, бывает очень мала. Поэтому уже в течение нескольких лет перед физикой стоит задача — осуществить искусственным путем потоки очень быстрых частиц, энергия которых была бы достаточна для ядерных расщеплений. С тех пор как электротехника научилась создавать электрические поля огромной силы, физики стали стремиться к тому, чтобы разгонять этими полями потоки ионов и придавать этим ионам скорость, пригодную для опытов с ядерными расщеплениями. В трубке с разреженным газом, через которую проходит ионный электрический ток, нетрудно получить токи силой в тысячную долю ампера, что составляет в секунду примерно  $6 \cdot 10^{15}$  ионов, заряженных элементарным электрическим зарядом. Если бы только удалось придать этим ионам такую же самую энергию, какой обладают вылетающие из радиоактивных веществ альфа-частицы, то такой поток ионов был бы равносителен сотням килограмм радия! Да к тому же еще ионы все движутся по одному направлению, а альфа-частицы радия разлетаются во все стороны.

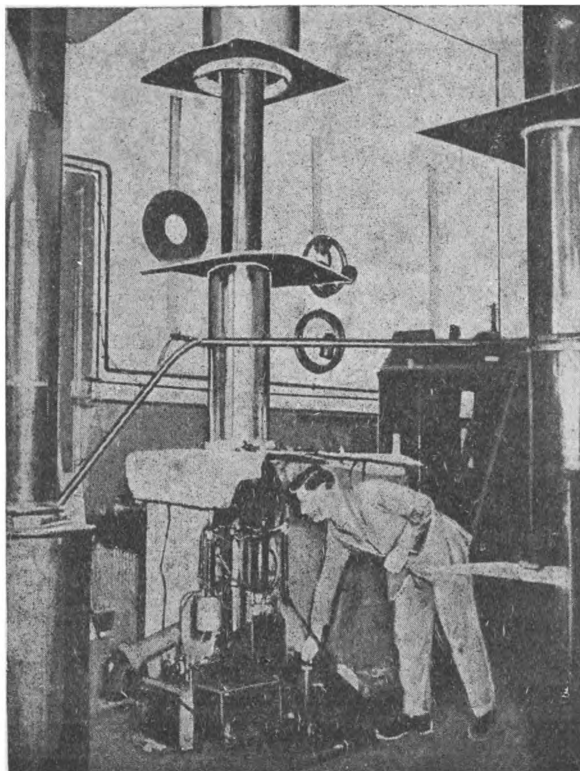
Читатели, которые хотят подробнее ознакомиться со всеми возможными способами получения ионных потоков, применяемыми в ядерной физике, могут прочесть посвященную этому вопросу книгу А. К. Вальтера «Физика атомного ядра». Здесь мы не будем рассказывать о подробностях конструкций этих

«ионных пушек». Эти подробности относятся скорее к области техники, чем к физике. Здесь мы расскажем только о тех результатах, которые были получены физиками в результате применения этих громоздких приборов, в которых развиваются электрические напряжения в сотни тысяч и даже миллионы вольт.

Первый успех в этой области был достигнут двумя молодыми английскими учеными — Коккрофтом и Уолтоном — учениками Резерфорда, работающими в Кэвендишевской лаборатории. В 1932 году они построили ионную пушку, в которой было напряжение до 700 тысяч вольт. В этой ионной пушке разгонялись протоны, и поток этих протонов падал на вещество, атомные ядра которого должны были быть подвергнуты протонной бомбардировке. (Заметим, что протоны обладают по сравнению с альфа-частицами еще и тем преимуществом, что их заряд меньше, чем заряд альфа-частиц. Поэтому они не так сильно отталкиваются от обстреливаемых ядер и, следовательно, при той же самой энергии, могут подойти к этим ядрам на более близкое расстояние, чем подошли бы альфа-частицы).

Своим потоком протонов Коккрофт и Уолтон подвергли бомбардировке целый ряд элементов. В первую очередь они стали бомбардировать протонами литий, который, как мы знаем, не подвергается искусственному превращению при обстреле его альфа-частицами. Для того, чтобы исследовать расщепление ядер лития, Коккрофт и Уолтон поставили на пути пучка протонов, под углом  $45^\circ$  к нему, экран, покрытый слоем лития. В стенке трубы, напротив этого экрана, было проделано окошечко, закрытое тонким слоем слюды. Через это окошечко могли проскакивать частицы, получившиеся в результате расщепления ядер лития. Расщепление, как показали опыты, начиналось тогда, когда напряжение электрического поля в трубке доходило до 125 тысяч вольт. В это время на экране из сернистого цинка, поставленном против

слюдяного окошечка, стали появляться яркие вспышки (5 вспышек в минуту при силе протонного тока в одну мил-

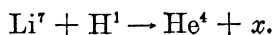


Дж. Д Коккрофт и его прибор для получения потоков заряженных частиц с энергией в сотни тысяч электрон-вольт (Кэвендишевская лаборатория). На этом приборе было впервые осуществлено расщепление атомных ядер протонами (Коккрофт и Уолтон в 1932 г.)

лионную долю ампера). Эти вспышки, как заключили из своих опытов Коккрофт и Уолтон, вызывались альфа-частицами, которые выбивались протонами из ядер лития. Энер-

гия этих альфа-частиц была такова, что они могли бы пройти в воздухе путь, превышающий 8 см.

Какова формула ядерной реакции, которую осуществили Коккрофт и Уолтон? Наиболее распространенным из обоих изотопов лития является «литий семь». Если предположить, что протон выбивает альфа-частицу именно из ядра этого изотопа, а не из ядра изотопа «литий шесть», то легко сосчитать, что остается от ядра  $\text{Li}^7$  после того, как протон вышиб из него альфа-частицу. Мы должны решить уравнение



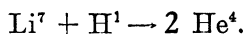
Ясно, что ядро «икс» имеет атомный вес 4. Кроме того, так как для  $\text{Li}$   $Z=3$ , для  $\text{H}$   $Z=1$ , для  $\text{He}$   $Z=2$ , то оно имеет заряд, равный  $3+1-2=2$  положительным элементарным зарядам. Иными словами «икс» должен быть тоже альфа-частицей.

Итак, если предположение Коккрофта и Уолтона правильно, то ядро лития при обстреле протонами распадается на две одинаковые альфа-частицы.

Чтобы проверить это заключение, Коккрофт и Уолтон сделали следующий остроумный опыт: вместо того, чтобы воспользоваться только одним экраном, на который должны падать выбиваемые из ядер лития альфа-частицы, они поставили два таких экрана, друг напротив друга. У каждого экрана был посажен наблюдатель, который должен был нажимать рукой на особый телеграфный ключ, как только увидит на экране вспышку. Каждое нажатие ключа сейчас же отмечалось на телеграфной ленте, причем оба ключа делали отметку на одной и той же ленте — один в верхней половине ленты, другой в нижней. Когда лента была рассмотрена, оказалось, что каждое нажатие ключа одного наблюдателя происходило точь в точь в тот же самый момент, что и нажатие ключа другого наблюдателя. Значит обе альфа-частицы разлетались в противоположные стороны одновременно.

Это вполне подтвердило догадку Коккрофта и Уолтона о том, что ядро лития, поглотив протон, сразу распадается на две альфа-частицы.

Это значит, что формулу ядерной реакции, открытой Коккрофтом и Уолтоном, можно написать так:



Эта реакция протекает с огромным выигрышем энергии: каждая из двух одинаковых альфа-частиц, разлетающихся в противоположные стороны при взрыве ядра лития, имеет энергию, достаточную для того, чтобы пробежать в воздухе путь немногим больше 8 см. Эта энергия равна 8,6 миллионам электрон-вольт. Значит обе частицы имеют в общей сложности энергию 17,2 миллиона электрон-вольт. А упавший протон, пробежавший электрическое поле напряжением в 125 тысяч вольт, имеет, следовательно, энергию всего лишь в 0,125 миллиона электрон-вольт. Итак, затрачено 0,125 миллиона, а получено 17,2 миллиона электрон-вольт. Итого получается выигрыш приблизительно в 17,1 миллионов электрон-вольт, огромный выигрыш даже по сравнению с тем, который получался в опыте Резерфорда с расщеплением алюминия альфа-частицами.

Что касается количества разрушенных ядер лития, то расчеты, произведенные Коккрофтом и Уолтоном, показали, что при напряжении ионной пушки в 250 тысяч вольт одна альфа-частица выбивается на миллиард протонов, упавших на литиевый экран, а при напряжении в 500 тысяч вольт одна альфа-частица появляется на 100 миллионов протонов. Значит, при обстреле протонами получается гораздо меньший процент удачных попаданий, чем при обстреле альфа-частицами. Это обстоятельство, в сущности, уничтожает то огромное преимущество, которое имеет поток искусственно разогнанных протонов по сравнению с альфа-частицами, — пре-

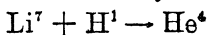


имущество большой концентрированности и большого количества частиц в секунду.

Ядерная реакция, открытая Коккрофтом и Уолтоном, очень интересна еще и вот в каких двух отношениях.

Во-первых из самой формулы реакции видно, что альфа-частица, как физики догадывались и раньше, действительно имеет сложный характер, т. е. состоит из частей, причем в ее состав входят протоны. Ведь из формулы видно, что влетевший в ядро лития протон должен был обязательно войти в состав по крайней мере одной из двух вылетевших альфа-частиц. А так как обе альфа-частицы совершенно одинаковы, то из того, что протон входит в состав одной из них, вытекает, что и другая, и вообще любая альфа-частица содержит в своем составе протоны. Это обстоятельство подкрепляет сделанное нами раньше предположение о том, что может происходить превращение водорода в гелий (по формуле  $4\text{H} \rightarrow \text{He}$ ), хотя до сих пор еще никто не наблюдал этого превращения. (Заметим, что количество энергии, выделяемое при образовании одного атома гелия, должно составлять 26,5 миллионов электрон-вольт, т. е. быть еще больше, чем энергия, выделяемая при расщеплении одного ядра лития).

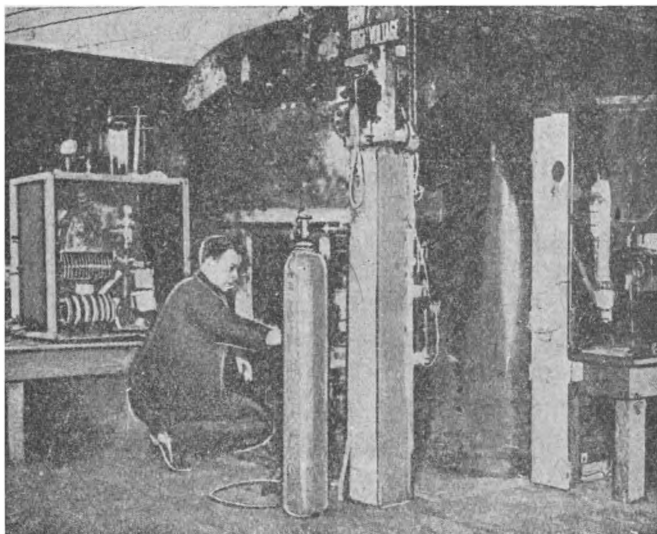
Во-вторых реакция Коккрофта и Уолтона дает нам удобный случай проверить утверждение Эйнштейна о том, что выделение энергии сопровождается уменьшением массы в количестве  $4,67 \cdot 10^{-14}$  гр на каждую калорию энергии. (Пересчитав на электрон-вольты, мы находим, что это дает  $1,77 \cdot 10^{-33}$  гр на каждый электрон-вольт энергии). Для того, чтобы проверить это соотношение Эйнштейна, заметим следующее: из опытов с масс-спектрографом следует, что если принять точный вес альфа-частицы за 4,000, то точный вес ядра «лития семь» окажется равным 7,008, а точный вес водородного ядра 1,0069. Поэтому в формуле реакции



слева стоит вес  $7,008 + 1,007 = 8,015$ , а справа 8,000, т. е. при этой реакции происходит уменьшение веса на 0,015 в таких единицах, в которых вес альфа-частицы принят за 4,000. Так как вес альфа-частицы равен  $6,598 \cdot 10^{-24}$  гр, то это уменьшение веса равно  $2,48 \cdot 10^{-26}$  гр. Пересчитывая на электрон-вольты с помощью соотношения Эйнштейна, мы находим, что выделенная энергия в реакции Коккрофта-Уолтона должна была бы равняться 14 миллионам электрон-вольт. Опыты дали, как мы видели, несколько бóльшую величину, а именно 17 миллионов электрон-вольт, но если принять во внимание, что так называемые «точные» атомные веса изотопов, измеренные в масс-спектрографе, на самом деле не вполне точны, то окажется, что расхождение между вычисленной величиной (14 миллионов электрон-вольт) и наблюдаемой (17 миллионов электрон-вольт) может быть целиком отнесено за счет неточности измерений в масс-спектрографе. В пределах ошибок опыта, выведенное Эйнштейном соотношение между выделением энергии и уменьшением массы нужно признать вполне подтвердившимся. Поэтому мы обязаны с доверием относиться и к той вычисленной величине энергии, которая должна выделяться при реакции превращения водорода в гелий, — реакции, еще никем не наблюдаемой на опыте.

Успех Коккрофта и Уолтона, сумевших добиться расщепления ядер потоком протонов, искусственно разогнанных сильными электрическими полями, побудил многих других исследователей тоже заняться изучением этого явления. В настоящее время в целом ряде стран (в том числе и у нас в СССР) существуют установки для получения потоков ионов, обладающих большой энергией. Некоторые из этих установок весьма остроумны по идее. Такова, например, установка, изобретенная американским физиком Лоренсом. В этой установке, предназначенной для получения потока очень быстрых легких ионов, к прибору приложено сравни-

тельно небольшое электрическое напряжение, но зато ионы проходят через это электрическое поле не один раз, а очень много раз подряд, вследствие чего в результате они разгоняются до огромных скоростей. Это достигается посредством применения магнитного поля, которое искривляет пути дви-



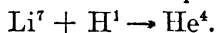
Проф. Лоренс и его прибор для получения потоков заряженных частиц с энергией в несколько миллионов электрон-вольт (университет Беркли). На этом приборе было впервые осуществлено расщепление атомных ядер диплонами (ядрами тяжелого изотопа водорода).

жущихся ионов так, что эти пути, закручиваясь, снова вынуждены пройти через то же самое электрическое поле. В первой такой установке, построенной в лаборатории Калифорнийского университета Лоренсом и Ливингстоном, к прибору было приложено напряжение всего лишь в четыре тысячи вольт, но протоны проходили сквозь это напряжение 300 раз, в результате чего они приобретали энергию в 1,2 миллиона электрон-вольт. В дальнейших своих работах

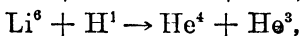
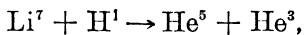
Лоренс и Ливингстон сумели добиться еще более высоких значений энергии протонов.

Все эти установки, основанные на различных технических идеях, были использованы для расщепления ядер потоками быстрых ионов водорода (протонов и дейтронов) и гелия («искусственных альфа-частиц»). Мы рассмотрим важнейшие результаты опытов расщепления ядер протонами.

Расщепление протонами ядер лития изучалось помимо Коккрофта и Уолтона также целым рядом других исследователей. Некоторые из этих физиков, применяя гораздо более чувствительные методы обнаружения альфа-частиц, доказали, что расщепление ядер лития происходит и при сравнительно очень небольшой энергии протонов. Так, например, в Кэвендишевской лаборатории Резерфорд и его сотрудник Олифант сумели обнаружить расщепление ядер лития при энергии падающих протонов равной 30 тысяч электрон-вольт. Траубенберг (в Германии) наблюдал расщепление даже при 13 тысячах. На каждый миллиард падающих на литий протонов получают приблизительно два расщепления при энергии протонов в 250 тысяч электрон-вольт, 10 расщеплений при энергии в 500 тысяч и 40 при энергии в миллион электрон-вольт. Кирхнер (в Германии), а также Ди и Уолтон (в Англии) наблюдали расщепление лития в камере Вильсона. Все эти опыты не оставляют никакого сомнения в том, что расщепление лития действительно происходит по формуле

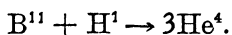


Кроме альфа-частиц с пробегом 8,4 см в воздухе (т. е. с энергией  $8,6 \cdot 10^6$  электрон-вольт) удалось наблюдать при расщеплении лития еще и короткопробежные частицы (пробег 1,2 см и 0,7 см в атмосферном воздухе). Резерфорд предложил гипотезу о том, что эти короткопробежные частицы возникают при реакциях:



т. е. что эти короткопробежные частицы состоят из ядер изотопов гелия  $\text{He}^5$  и  $\text{He}^3$  (напомним, что таких изотопов гелия до сих пор еще никто не наблюдал). Объяснение Резерфорда еще нуждается в проверке.

Кроме лития можно разбивать протонами также ядра других элементов. Перечислим вкратце важнейшие результаты. Расщепление ядер бора начинается при энергии протонов, равной 30 тысячам электрон-вольт (опыты Резерфорда и Олифанта). При больших напряжениях количество удачных попаданий при обстреле бора протонами, т. е. число расщеплений, во много раз больше, чем число расщеплений лития. Механизм реакции такой:



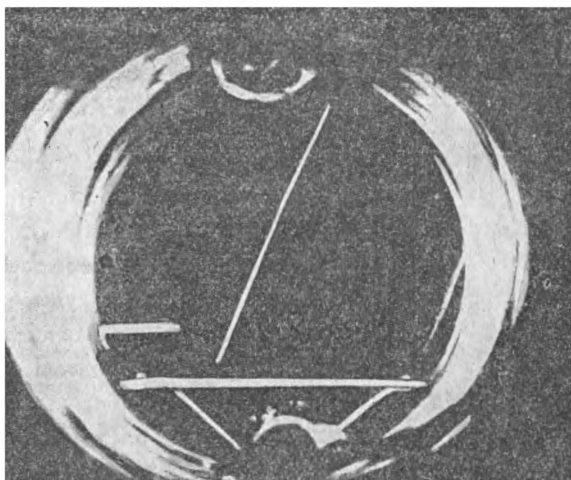
Ядро «бора одиннадцать», поглотив протон, разлетается затем вдребезги, превращаясь в три альфа-частицы. При этом получается выигрыш энергии в 11 миллионов электрон-вольт на каждое расщепленное ядро. Это подтверждается также и исследованиями, произведенными с помощью камеры Вильсона.

При обстреле протонами разбиваются также и ядра бериллия и фтора. Расщепление бериллия протонами наблюдалось в опытах Коккрофта и Уолтона, а также Лоренса и Ливингстона. Но все другие авторы уверяют, что бериллий и фтор не расщепляются. Поэтому вопрос следует признать спорным. Коккрофт и Уолтон наблюдали также расщепление более тяжелых элементов (калий, кальций, железо, никкель, медь, серебро, свинец, уран), но это расщепление, как выяснили затем Резерфорд и Олифант, объяснялось тем обстоятельством, что при прохождении разряда через трубку исследуемые вещества загрязнялись бором из боросиликатного стекла трубки, и весь эффект испускания альфа-частиц был обусловлен, следовательно, этой примесью бора. Впрочем, некоторые другие исследователи (Браш и Ланге) продолжают

утверждать, что протоны (правда, с гораздо большей энергией, чем в опытах Коккрофта и Уолтона) вызывают расщепление ядер свинца.

В 1932 году Дж. Чэдвик открыл совершенно новый вид ядерного расщепления, о существовании которого никто не подозревал раньше. К этому открытию привело его изучение найденного в 1930 году немецкими физиками Боте и Беккером явления испускания гамма-лучей различными ядрами легких элементов при их бомбардировке альфа-частицами. Применяя в качестве источника альфа-лучей полоний (радий F), испускающий альфа-частицы с кинетической энергией 5,3 миллионов электрон-вольт, Боте и Беккер нашли, что целый ряд элементов (литий, бериллий, бор, фтор, натрий, магний, алюминий) испускает при бомбардировке ядер этих элементов альфа-частицами гамма-лучи; это показывает, что падающая в ядро и застревающая в нем альфа-частица не всю свою энергию отдает на выбрасывание протона, но часть ее идет и на излучение в форме гамма-лучей. Заметим при этом, что из перечисленных элементов литий и бериллий не испускают протонов; поэтому в этом случае нужно говорить о том, что не вся энергия поглощенной альфа-частицы передается поглотившему ее ядру, но часть уходит на излучение. Особенно интенсивное испускание гамма-лучей при бомбардировке альфа-частицами Боте и Беккер обнаружили в случае бериллия. В 1931 г. Ирен Кюри-Жолио (дочь Марии и Пьера Кюри, открывших радий) и ее муж Фредерик Жолио нашли, что лучи, испускаемые бериллиевыми ядрами при бомбардировке их альфа-частицами полония, обладают свойством выбивать весьма быстрые протоны из веществ, содержащих водород (например, из воды или из парафина). Если поставить между бериллием, испускающим эти лучи, и ионизационной камерой воду или парафин, то ионизация резко возрастет, так как протоны, попадающие в ионизационную камеру, будут производить там множество

ионов. В 1932 г. Дж. Чэдвик нашел, что лучи, испускаемые бериллием, обладают также свойством приводить в движение ядра азота, гелия, углерода и др. Все эти свойства испускаемых бериллием лучей показались Чэдвику весьма странными, так как обыкновенные гамма-лучи, хотя и производят



Протон, выбитый нейтроном из слоя парафина, помещенного внутри камеры Вильсона. Источник нейтронов (смесь бериллия и полония) находился внизу, вне камеры.

ионизацию, выбрасывая из атомов электроны, но не могут сообщить ядрам атомов столь большие скорости. Отсюда Чэдвик заключил, что большая часть лучей, испускаемых бериллием при обстреле его ядер альфа-частицами полония, совсем не является гамма-лучами, хотя и имеет с последними то сходство, что не испытывает никакого отклонения ни в электрическом ни в магнитном поле. Для того, чтобы объяснить наблюдаемые действия этих лучей, нужно было допустить, что они состоят из материальных частиц, не обладающих зарядом; такие частицы Чэдвик назвал «нейтронами».

Таким образом Чэдвик открыл новую составную часть атомных ядер, а именно нейтрон, выбиваемый из ядер бериллия альфа-частицами радия F. Не обладая электрическим зарядом, быстро движущийся нейтрон не взаимодействует с электронами, которых он встречает на своем пути; поэтому он не выбивает электронов из электронных оболочек атомов и почти не производит, следовательно, никаких ионов. Ясно, что при фотографировании в камере Вильсона мы поэтому не получим никаких трэков, соответствующих путям нейтронов. Но там, где нейтрон сталкивается с атомными ядрами, он может привести их в движение; эти ядра, двигаясь дальше, производят на своем пути ионы и могут быть обнаружены по своим действиям в ионизационной камере или же по своим трэкам, фотографируемым в камере Вильсона. Из опытов



След, оставленный в камере Вильсона ядром гелия после его столкновения с нейтроном (снимок в камере, наполненной гелием). Снимок произведен киноаппаратом

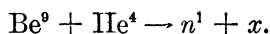


След протона, выбитого нейтроном. Источник нейтронов находился сверху, вне камеры. Протон, очевидно, был выброшен из молекулы водяного пара, наполняющего камеру Вильсона.

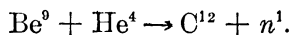


над выбитыми ядрами можно заключить о весе и о скорости нейтрона. По максимальной длине пробега выбитых ядер Чэдвик заключил, что максимальная энергия, которую нейтрон может сообщить водородному ядру, равна 5,7 миллионов электрон-вольт, а азотному ядру — 1,2 миллиона электрон-вольт. Отсюда можно, пользуясь законами механики, рассчитать сколько весит нейтрон. Оказалось, что он весит почти точно столько же, сколько весит протон.

Так было сделано это замечательное открытие Чэдвика, которое показало, что внутри атомных ядер существуют частицы, весящие столько же, сколько весит протон, но не заряженные электричеством. Для того, чтобы уметь писать формулы таких ядерных реакций, в которых играют роль нейтроны, необходимо придумать для нейтрона какое-нибудь удобное обозначение. Обозначим его, например, буквой  $n$ . А когда мы будем писать формулы реакций, обозначая атомные веса ядер, то к букве  $n$  мы будем приписывать сверху единицу, потому что ближайшее целое число к атомному весу нейтрона есть, как мы сказали, 1. Поэтому легко сосчитать, например, что остается от ядра бериллия после того как альфа-частица вышибает из него нейтрон. Если обозначить этот неизвестный остаток буквой  $x$ , то получится

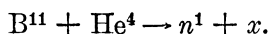


Ясно, что у ядра  $x$  должен быть атомный вес 12 (ведь  $12 = 9 + 4 - 1$ ). Что касается его заряда, то у Be  $Z = 4$ , у He  $Z = 2$ , а у нейтрона, очевидно,  $Z = 0$ ; значит у ядра  $x$   $Z = 6$ : иными словами, это должен быть углерод. Поэтому формула выбивания нейтрона альфа-частицей из ядра бериллия должна быть такова:

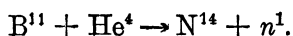


В результате реакции получается нейтрон и ядро «углерода двенадцать».

Кюри-Жолио и Чэдвик нашли также, что нейтроны могут быть выбиты альфа-частицами из ядер бора. Существуют, как мы знаем, два изотопа бора: «бор десять» и «бор одиннадцать». Если предположить, что нейтроны вылетают из наиболее распространенного изотопа, т. е. из «бора одиннадцать», то можно рассчитать, какое ядро останется в результате выбивания нейтронов из бора. Обозначая это неизвестное ядро буквой  $x$ , пишем



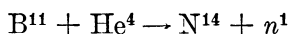
Отсюда следует, что у ядра  $x$  должен быть атомный вес  $11 + 4 - 1 = 14$ , а заряд  $Z = 7$ , т. к. у  $\text{B}$   $Z = 5$ , у  $\text{He}$   $Z = 2$ , у нейтрона  $Z = 0$ . Следовательно это ядро должно быть азотом. Поэтому реакция выбивания нейтрона из бора такова:



Чэдвик воспользовался этой реакцией для вычисления точного веса нейтрона. Приблизительный (целочисленный) вес нейтрона равен 1; но каков его точный вес?

Заметим следующее: выбитые из бора нейтроны могут в свою очередь сообщить вышибленным ими (например, из парафина) протонам энергию до 4,7 миллионов электрон-вольт. А так как протон весит приблизительно столько же, сколько нейтрон, то столкновение между ними можно представлять себе так же, как столкновение между двумя одинаковыми бильярдными шарами. Если один шар до столкновения стоял неподвижно, то самая большая скорость, которую он может получить при столкновении с другим шаром, получается при «лобовом ударе»: при этом ударе налетевший шар останавливается как вкопанный, а вся его энергия передается другому шару. Поэтому ясно, что нейтроны, выбитые альфа-частицами из ядер бора, имеют энергию 4,7 миллионов электрон-вольт (это и есть та энергия, которую они передают

протонам при лобовом ударе). А так как энергия альфа-частицы, испускаемой полонием, равна 5,25 миллионов электрон-вольт, то значит при выбивании нейтрона из бора происходит проигрыш энергии в 0,5 миллиона электрон-вольт. По соотношению Эйнштейна это соответствует тому, что сумма масс ядра азота и нейтрона должна быть на  $0,9 \cdot 10^{-27}$  гр больше, чем сумма масс ядра гелия и «бора одиннадцать». Если мы примем за единицу веса четверть веса альфа-частицы, т. е.  $1,649 \cdot 10^{-24}$  гр, то  $0,9 \cdot 10^{-27}$  гр будут равны 0,00054 единицы веса. В этих же единицах по данным масс-спектрографа Астона вес «бора одиннадцать» есть 11,005, а вес ядра азота 14,000. Поэтому в формуле

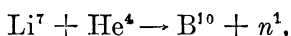


слева вес 15,005, а справа должен быть около 15,006 (так как увеличение массы есть 0,00054). Вычитая 14,000, получим, что вес нейтрона равен

$$1,006.$$

А так как вес водородного атома, выраженный в тех же единицах, есть 1,0074, то значит по вычислениям Чедвика нейтрон немножко легче, чем водородный атом.

Морис де-Бройль и Лепренс-Ренгэ обнаружили, что нейтроны могут выбиваться альфа-частицами также и из ядер лития. Эти нейтроны имеют энергию около 0,5 миллиона электрон-вольт (сравнительно медленные нейтроны). Формула такой реакции, как нетрудно сообразить, следующая:



так как при поглощении альфа-частицы и испускании нейтрона заряд ядра должен увеличиваться на 2 элементарных заряда.

Все эти опыты доказывают, что открытые Чедвиком частицы — нейтроны — являются составной частью атомных ядер. В связи с этим была высказана гипотеза, что

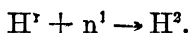
вообще все атомные ядра построены из соединения двух сортов частиц — протонов и нейтронов. Так, например, альфа-частица состоит из двух протонов и двух нейтронов, ядро «лития семь» из трех протонов и четырех нейтронов, и вообще всякое ядро, имеющее заряд, равный  $Z$  положительных элементарных зарядов и приблизительный целый атомный вес  $M$ , состоит из  $Z$  протонов и  $(M - Z)$  нейтронов. Эту гипотезу особенно подробно разработал известный немецкий теоретик В. Хайзенберг. По Хайзенбергу протоны и нейтроны образуют между собой внутри ядра более тесные комбинации — альфа-частицы. Число нейтронов не бывает меньше, чем число протонов, а поэтому число альфа-частиц определяется только наличием числом протонов и ничем больше. Если число протонов ( $Z$ ) четное, то в образовании альфа-частиц примут участие все протоны и столько же нейтронов; «свободными» останутся  $(M - 2Z)$  нейтронов. Поэтому такое ядро (с четным числом  $Z$ ) состоит по мнению Хайзенберга из  $Z/2$  альфа-частиц и из  $(M - 2Z)$  нейтронов. Если же число протонов ( $Z$ ) нечетное, то только  $(Z - 1)$  протонов и столько же нейтронов смогут принять участие в формировании альфа-частиц. Поэтому такое ядро (с нечетным  $Z$ ) будет состоять из  $\frac{1}{2}(Z - 1)$  альфа-частиц,  $(M - 2Z + 1)$  нейтрона и одного протона. Так, например, ядро «хлора тридцать семь» ( $Z = 17$ ,  $M = 37$ ) должно по этой гипотезе состоять из 8 альфа-частиц, 1 протона и 4 нейтронов.

Явление бета-распада по мнению Хайзенберга заключается в следующем: один из нейтронов ядра внезапно превращается в протон плюс электрон. Протон остается в ядре, а электрон улетает прочь. Если в ядре сперва не было «свободных» протонов, т. е. число  $Z$  было четное (в таком ядре все протоны соединяются с таким же числом нейтронов в альфа-частицы, и «свободных» протонов, как мы видели, нет), то в результате бета-распада появляется один свободный протон. Так как образование новой альфа-частицы всегда

сопровождается большим выделением энергии, то ядро, стремясь отдать как можно больше энергии, охотно выпустит вслед за вылетевшим электроном еще один, т. е. еще один нейтрон превратится в протон плюс электрон, электрон выскочит из ядра, а новый образовавшийся протон и тот, который только что образовался перед ним, войдут в компанию еще с двумя нейтронами и образуют альфа-частицу. Если мы взглянем на родословные радиоактивных элементов, которые были нарисованы в предыдущей главе, то увидим, как хорошо подтверждается эта, нарисованная Хайзенбергом, картина бета-распада. Испускание бета-частиц всегда происходит парами, т. е. вслед за одним бета-распадом непременно происходит и другой (например  $RaD \rightarrow RaE \rightarrow RaF$  или  $MThI \rightarrow MThII \rightarrow RaTh$ ), и только в некоторых случаях в промежутке между двумя последовательными бета-распадами вклинивается альфа-распад (например,  $RaB \rightarrow RaC \rightarrow RaC'' \rightarrow RaD$ ). При этом первый из двух таких бета-активных элементов обязательно имеет четное  $Z$ , т. е. там до распада нет «свободных» протонов. Первый свободный протон образуется после первого бета-распада, второй — после второго и оба эти образовавшиеся протона сейчас же соединяются с двумя нейтронами в альфа-частицу. При этом должно выделиться много энергии в виде гамма-лучей. И в самом деле опыт показывает, что при втором бета-распаде большей частью испускается особенно много гамма-лучей.

Наиболее простым из атомных ядер является, после ядра «водорода один», состоящего только из одного протона, ядро «водорода два» (тяжелого водорода), состоящее из протона и нейтрона. Резерфорд и его сотрудник Кемптон бомбардировали альфа-частицами препарата полония тяжелую воду, думая, что альфа-частицы сумеют разбить диплон (ядро тяжелого водорода) на протон и нейтрон. Но никаких следов такого расщепления диплонов найдено не было (если бы оно было, то во все стороны от такой бомбардируемой тяжелой

воды летели бы протоны и нейтроны, но этого не наблюдалось). Но зато в той же Кэвендишевской лаборатории Ли обнаружил, что при бомбардировке парафина или жидкого водорода нейтронами испускаются гамма-лучи. Из жесткости этих лучей Ли вычислил, что каждая ядерная реакция, в которой испускаются эти лучи, должна сопровождаться выделением энергии в 1 миллион электрон-вольт. Если взять за единицу атомного веса одну четвертую часть веса альфа-частицы, то вес протона будет 1,007, вес нейтрона 1,006. Значит сумма их весов будет 2,013. А по измерениям Бейнбриджа (в масс-спектрографе) вес диплона равен около 2,012. Поэтому при образовании диплона из протона и нейтрона должно выделяться около миллиона электрон-вольт. По мнению Ли те гамма-лучи, которые он наблюдал при прохождении нейтронов через водород, выделяются при реакции



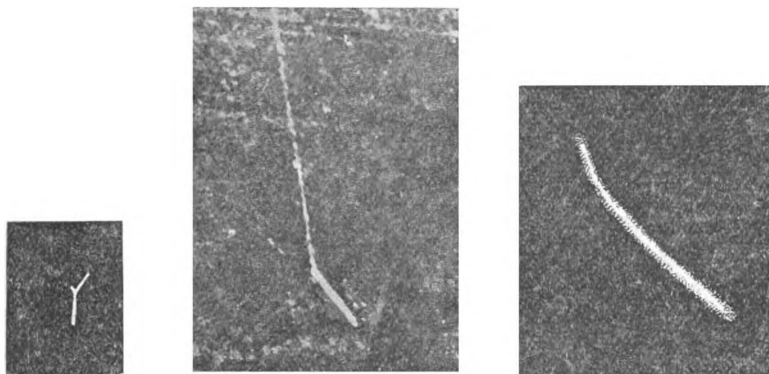
Если это правда, то это первый случай искусственного соединения ядер, осуществленный в физической лаборатории.

Лоренс, о котором мы говорили, как о создателе одной из наиболее остроумных установок для получения потока быстрых ионов, работает в том же самом Калифорнийском университете, в котором работает и Г. Н. Льюис. Поэтому Лоренс имел возможность получить от Льюиса первые порции его тяжелой воды и употребить их на создание потока очень быстрых диплонов (мы всюду пользуемся здесь этим термином Резерфорда, но сам Лоренс всегда называл ядра тяжелого водорода не диплонами, а дейтонами). Обстреливая диплонами многие элементы, Лоренс наблюдал, что при этом испускаются протоны и нейтроны. Это он объяснил тем, что, налетая на другое ядро, сам диплом разбивается вдребезги, распадаясь на один протон и один нейтрон.

В некоторых же случаях диплоны выбивают из ядер других

элементов альфа-частицы. Так, например, наблюдалась и была подробно изучена реакция

похожая на реакцию Коккрофта и Уолтона. Эту реакцию расщепления лития диплонами Ли и Уолтон наблюдали в ка-



Снимки Н. Федзера.

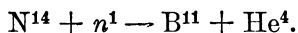
1) Нейтрон столкнулся с атомом азота, который пробежал некоторое расстояние и столкнулся с другим атомом азота („вилка“). 2) Нейтрон столкнулся с атомом азота, который сейчас же распался на альфа-частицу (тонкий трек) и ядро бора 11 (жирный трек). 3) Расщепление ядра кислорода нейтроном (вероятно по формуле  $O^{16} + \text{нейтрон} \rightarrow He^4 + C^{13}$ ). Короткий трек (от места столкновения вверх) принадлежит ядру углерода, длинный (от места столкновения вниз) — альфа-частице.

мере Вильсона. Альфа-частицы выбиваются диплонами также из ядер бериллия, бора, азота.

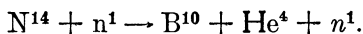
Рассмотрим еще явления, которые происходят при прохождении нейтронов через вещество. Так как нейтроны не обладают электрическим зарядом, то они почти совсем не взаимодействуют с электронами. Поэтому нейтроны совсем, или почти совсем не производят ионизации атомов; по измерениям Чэдвика нейтрон теряет всего лишь 20 электрон-вольт на ионизацию атомов при прохождении каждого сантиметра воздуха и если бы не столкновение с ядрами, то нейтроны, испу-

скаемые бериллием при бомбардировке альфа-частиц, могли бы пройти в воздухе 3 км! Поэтому сам нейтрон, проходя через камеру Вильсона, не оставляет в ней никакого трэка (следа).

Но столкновения нейтронов с ядрами атомов приводят к очень резкому уменьшению энергии движущегося нейтрона при каждом столкновении. Фотографирование трэков ядер, получивших скорость при столкновении с нейтронами, не представляет никакого труда. Вообще самый простой способ обнаружить нейтроны — это наблюдение (в камере Вильсона или другим способом) ядер, столкнувшихся с этими нейтронами и получивших от них часть их энергии. Делая фотографические снимки в камере Вильсона, наполненной азотом, через которую проходил поток нейтронов, сотрудник Чэдвика Федзер заснял много трэков, произведенных в камере азотными ядрами, пришедшими в движение после столкновения с нейтронами. В числе этих заснятых Федзером трэков были и такие, которые имели вид «вилок». Смысл этих вилок заключался в том, что азотное ядро, поглотившее нейтрон, затем вдруг распадалось на части, испуская, повидимому, ядро  $\text{He}^4$ . Отсюда видно, что нейтроны могут служить орудием расщепления ядер. Расщепление ядер азота нейтроном происходит по формуле:



Таким образом, в числе продуктов распада имеется ядро «бора одиннадцать». А в некоторых случаях, возможно, нейтрон не ловится, а улетает прочь, так что распад ядра азота происходит по формуле:



Нейтроны являются одним из лучших орудий расщепления ядер: на двух тысячах снимков Федзер обнаружил около ста трэков столкнувшихся с нейтронами ядер азота. Из этих трэков тридцать имели вид вилок. Это — огромный про-



цент «удачных попаданий», если сравнить с тем процентом, который получается при расщеплении альфа-частиц протонами. Беда только в том, что потоки нейтронов, которые физики имеют в своем распоряжении, очень мало интенсивны. Создание пучка нейтронов, содержащего очень большое количество нейтронов огромных скоростей, — вот к чему экспериментаторы должны были бы стремиться. Но пока еще эта задача не разрешена.

Опыты с расщеплением ядер, описанные в этой главе, дали физикам большой материал, относящийся к строению атомного ядра. Мы видим, что в состав атомных ядер входят альфа-частицы, протоны, нейтроны. Дальнейшие опыты должны принести еще более подробные сведения об устройстве атомных ядер.

## *Глава восьмая*

### КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ПОЗИТРОНЫ

Опыты с искусственным расщеплением атомного ядра, описанные в предыдущей главе, имеют целью открыть и изучить все те сорта частиц, из которых состоят существующие в природе тела. Но не только такие опыты могут дать нам существенную информацию об этих основных частицах. В 1932 году были сделаны совершенно новые неожиданные открытия, относящиеся к новому сорту таких частиц. Эти открытия пришли с неожиданной стороны — со стороны исследования «космических лучей».

Под названием космических лучей известно одно явление, которое было открыто физиками уже довольно давно — приблизительно в 1910 году. Швейцарский физик Гоккель изучал «собственную ионизацию» воздуха, вызываемую проходящими через воздух лучами радиоактивных веществ. Небольшие количества радиоактивных веществ всегда находятся в почве, и поэтому испускаемые ими лучи, проходя через воздух, всегда до некоторой степени ионизуют его, делая его проводником электричества. Поэтому заряженный электрометр, помещенный в воздухе, всегда более или менее медленно разряжается. Измерение быстроты, с которой разряжается заряженный электрометр, позволяет судить о степени ионизации воздуха. Гоккель решил проверить, действительно ли ионизация воздуха производится лучами радиоактивных веществ, находящихся в почве. Поэтому он поднялся с заряженным

электрометром на воздушном шаре, рассуждая так: если воздух ионизируется лучами, исходящими из радиоактивных веществ земной коры, то при удалении от поверхности земли эти лучи должны, вследствие их поглощения в воздухе, ослабевать, а поэтому и ионизация воздуха должна становиться все слабее и слабее. По мере того, как Гоккель поднимался на своем воздушном шаре, ионизация воздуха действительно уменьшалась, но это уменьшение прекратилось на высоте двух километров. При дальнейшем поднятии вверх ионизация воздуха, к великому удивлению Гоккеля, не только не уменьшалась, но даже увеличивалась. Высота поднятия воздушного шара Гоккеля была 4,5 км. Опыт Гоккеля затем повторил с более точными и чувствительными приборами немецкий физик Гесс: он совершил десять подъемов на воздушном шаре (в 1911—1913 годах) на высоту 5 км. Увеличение ионизации воздуха начиналось, по измерениям Гесса, с высоты 400 м.

Чем объяснить это непонятное увеличение ионизации воздуха, происходящее по мере поднятия наблюдателя в атмосфере? Гесс сделал смелую гипотезу, которая заключается в следующем: ионизация воздуха вызывается не только лучами радиоактивных веществ, находящихся в почве. Она вызывается также и другими особенными лучами, которые проникают в нашу атмосферу из космического (мирового) пространства. Эти лучи, проходя через толщу атмосферы, постепенно поглощаются, и поэтому до поверхности земли доходит лишь сравнительно небольшая их часть. Но когда мы поднимаемся на воздушном шаре все выше и выше, интенсивность этих лучей возрастает и следовательно возрастает также и вызываемая ими ионизация. Если бы мы смогли вовсе выйти из нашей атмосферы, то мы обнаружили бы, что все мировое пространство пронизано этими таинственными «космическими лучами».

Наблюдения Гоккеля и Гесса были повторены Кольхерсте-

ром, который в 1914 году поднялся на воздушном шаре до высоты 9300 м, взяв с собой специально сконструированный электрометр: показания этого электрометра не зависели от температуры и давления окружающего воздуха. Такие поднятия на воздушных шарах неоднократно предпринимались и впоследствии, причем наблюдения Гесса и Гоккеля были полностью подтверждены: с увеличением высоты в атмосфере ионизация воздуха растет. В 1931—32 годах бельгийский физик Пиккар совершил два подъема в специально оборудованном стратостате: достигнутая им высота равнялась 16,2 км. Еще большей высоты достиг в 1933 году советский стратостат «СССР», поднявшийся на высоту 19 км. Следует заметить, впрочем, что для изучения космических лучей подъемы на стратостатах не дают особенно ценных результатов, так как наблюдатели всегда бывают при этом чрезмерно заняты или чрезмерно взволнованы для того, чтобы вести непрерывные наблюдения. Гораздо более надежные результаты дает поднятие «баллонов-зондов», снабженных автоматическими записывающими приборами. Первые опыты изучения космических лучей с помощью автоматических записывающих приборов были сделаны в 1926 году Милликэном и Боуеном. Из четырех баллонов-зондов, выпущенных ими в Тексасе (США), два были найдены; один из них достиг высоты 11,2 км, а другой — 15,5 км. Но самых больших успехов в этом отношении достиг немецкий физик Регенер. Он сконструировал чрезвычайно остроумный прибор, который весит всего лишь 1,5 кг и вместе с тем автоматически записывает 1) ионизацию воздуха 2) момент времени, к которому относится это измерение, 3) давление воздуха, которое было в этот момент времени и 4) температуру. Идея прибора заключается в следующем: часовой механизм все время поворачивает ленту светочувствительной (фотографической) бумаги. В совершенно определенных, заранее фиксированные моменты времени тот же часовой механизм зажигает электрическую

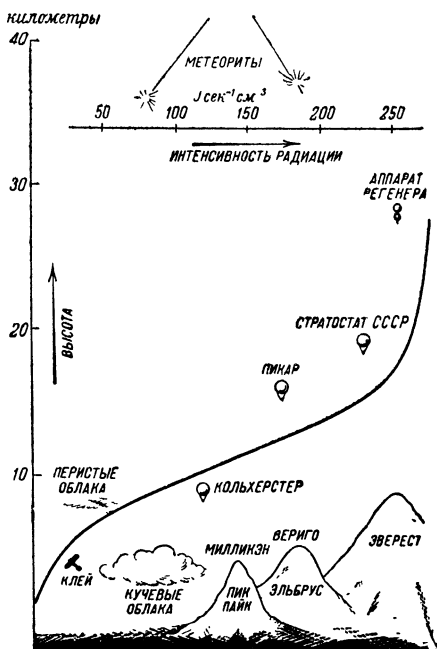


**Проф. Регенер во дворе Высшей технической школы в Штутгарте производит испытание своих баллонов-зондов, снабженных самопишущими приборами для измерения интенсивности космических лучей в стратосфере.**

лампочку. Между лампочкой и светочувствительной бумагой находится нить электрометра, положение которой поэтому фотографируется в момент зажигания лампочки. Из положения нити электрометра можно заключить о том, какова была ионизация воздуха в тот момент, когда зажигалась лампочка. Стрелка чувствительного барометра-анероида перемещается вверх и вниз между лампочкой и нитью электрометра; поэтому в заснятом изображении нити получается небольшой перерыв, положение которого определяется давлением воздуха. Совершенно таким же образом записывается и показание чувствительного термометра, снабженного стрелкой. Вся эта система изумительна по своей экономичности,

которая и делает возможным столь небольшой вес прибора при всей многочисленности возложенных на него обязанностей. Регенер выпускал свои приборы в 1932 и 1933 году; в 1932 году была достигнута высота 27 км, а в 1933 году — высота 35 км. Полученные результаты дают возможность начертить кривую, показывающую интенсивность космических лучей на различных высотах.

Кривая Регенера приведена рядом: на вертикальной оси откладывается высота над земной поверхностью (число кило-



Кривая Регенера.

метров), а на горизонтальной оси — вызываемая космическими лучами ионизация воздуха (число пар ионов, возникающих в секунду в каждом кубическом сантиметре воздуха, находящегося при температуре  $0^{\circ}$  и нормальном атмосферном давлении). На высоте 2 км космические лучи производят в среднем всего лишь 5,6 пар ионов в секунду, но затем это число быстро растет, достигая 250 пар ионов на кубический сантиметр в секунду на высоте 18 км. Дальнейшее возрастание интенсивности происходит не столь быстро, стремясь примерно к пределу 275 пар ионов на кубический сантиметр в секунду. Этот предел характеризует интенсивность космических лучей в мировом пространстве, вне нашей атмосферы. Отсюда видно, что интенсивность космических лучей уменьшается во много раз при прохождении всей толщи атмосферного воздуха.

А как поглощаются космические лучи в других веществах? Прежде всего было изучено поглощение космических лучей в воде. Это производилось посредством погружения в воду особых специально сконструированных электрометров, или же посредством опускания самого наблюдателя под воду в подводной лодке. Опыты в подводной лодке производил в Финском заливе ленинградский физик А. Б. Веригу в 1929—1930 г. г. Глубина опускания была 40 м. Что касается опускания приборов без наблюдателя, то в 1925 году ленинградские физики Мысовский и Тувим промерили поглощение космических лучей в воде Онежского озера до глубины 12 м; американцы Милликэн и Кэмерон в том же году опускали электрометр в воду глубоких горных озер Северной Америки до глубины 23 м. Но рекорд был побит в 1929 году Регенером, которому принадлежит, как мы видели, и рекорд высоты: глубина опускания самопишущего прибора в его опытах составляла 230 м. Многие авторы изучили также поглощение космических лучей в различных твердых телах (лед, свинец, сталь). Общий результат всех этих исследований таков: по-

глошение космических лучей, в общем, определяется только весом того вещества, через которое проходят космические лучи. Проходя через атмосферу, космические лучи ослабляются почти в сто раз, а после прохождения 250 м воды от них почти ничего не остается. Все это может произвести такое впечатление, что космические лучи во много раз уступают обыкновенным видимым лучам света в отношении способности проходить через слои различных веществ. Но сравнение будет гораздо более выгодным для космических лучей, если рассмотреть их поглощение в таких веществах, как например металлы. Проходя без особенно заметного ослабления через метровую толщу воды, космические лучи пройдут без заметного ослабления и через слой железа в  $1/8$  м толщины и через слой свинца в  $1/11$  м толщины (напомним, что поглощение космических лучей определяется, как показал опыт, весом того слоя вещества, через который они проходят; а слой железа в  $1/8$  м толщины или слой свинца в  $1/11$  м толщины весят столько же, сколько метровая толща воды). Способность проходить через металлы у космических лучей, следовательно, оказывается гораздо большей, чем у самых жестких рентгеновских лучей или гамма-лучей. Поэтому космические лучи получили также и другое название — «проникающие лучи».

Что же такое представляют собой космические лучи? Первые исследователи (Милликэн и другие) были яростными приверженцами того взгляда, что космические лучи состоят из таких же электромагнитных колебаний, как и видимый свет, рентгеновские лучи и гамма-лучи радиоактивных веществ, но только с гораздо меньшей длиной волны — раз в тысячу меньше, чем длина волны самых жестких гамма-лучей. Но в 1929 году немецкие физики Боте и Кольхерстер произвели замечательный опыт, который заставил их притти к совершенно другому взгляду на природу космических лучей. Боте и Кольхерстер использовали чувствительный счетчик Гейгера-Мюллера, который, как мы уже знаем из главы IV, представляет собой



ионизационную камеру, способную регистрировать каждую проходящую через нее заряженную частицу. Боте и Кольхерстер взяли два таких счетчика и поставили их один над другим. Прохождение заряженных частиц через оба счетчика регистрировалось на особой ленте самопишущего прибора: при этом ток, проходящий через один счетчик, отмечался на верхней половине ленты, а ток, проходящий через другой, — на нижней. Рассматривая свою ленту, Боте и Кольхерстер обнаружили, что в очень большом числе случаев показание одного счетчика в точности совпадает с показанием другого. Такое совпадение двух показаний свидетельствует о том, что одна и та же очень быстрая заряженная частица прошла сразу через оба счетчика (точнее говоря, не сразу, а сперва через один, затем через другой; но так как частица движется с огромной скоростью, то показания обоих счетчиков происходят практически совершенно одновременно). Частица, вызывающая совпадение показаний обоих счетчиков, не может быть электроном или альфа-частицей, испускаемыми каким-нибудь находящимся в воздухе радиоактивным веществом: такие электроны и альфа-частицы не обладают достаточно большой энергией для того, чтобы пронизать оба счетчика один за другим. Эта заряженная частица должна принадлежать космическим лучам. Боте и Кольхерстер вставили между обоими своими счетчиками слой золота до 41 мм толщины. При вставлении слоя золота число совпадений обоих счетчиков в минуту становилось меньше — явным образом потому, что часть заряженных частиц, успевших пройти через первый счетчик, поглощалась в золоте на пути ко второму счетчику. Поглощение частиц, вызывающих совпадения счетчиков, оказалось в опыте Боте и Кольхерстера совершенно таким же самым, как общее поглощение космических лучей в слое золота той же самой толщины. Отсюда Боте и Кольхерстер вывели заключение, что космические лучи, наблюдаемые нами у поверхности земли, состоят из потоков весьма быстрых заряженных частиц. Опыты Боте и Кольхер-

стера с совпадениями показаний счетчиков были повторены итальянским физиком Росси. Вместо слоя золота он брал слой свинца, причем доходил до толщины в 1 м.

Эти опыты заставляют прийти к заключению, что космические лучи состоят из быстрых заряженных частиц, например из электронов, движущихся с огромнейшими скоростями. Но спрашивается, имеют ли космические лучи такой же самый состав и тогда, когда они падают из мирового пространства в земную атмосферу, или же в мировом пространстве они имеют совершенно другой состав и превращаются в поток заряженных частиц лишь после того, как проходят через атмосферу? Этот вопрос о природе «первичных» космических лучей возникает потому, что космические лучи, как мы уже знаем, при прохождении через атмосферу очень сильно поглощаются, а поэтому легко могло бы быть, например, что до входа в атмосферу космические лучи состояли из очень коротких электромагнитных волн, которые, пройдя через толщу атмосферы или даже через часть этой толщи, совершенно поглотились, но из тех атомов, в которых они поглотились, вырвались взамен очень быстрые электроны, и эти-то электроны доходят до нас в виде наблюдаемых нами космических лучей. Как проверить, действительно ли заряженные частицы возникают лишь в результате поглощения первичных лучей, состоящих из электромагнитных волн, или же сами первичные лучи, входящие в атмосферу из мирового пространства, состоят из таких быстрых заряженных частиц? Для этого существует следующий способ.

Известно, что движущиеся заряженные частицы отклоняются в магнитном поле от первоначального направления своего пути, а лучи, состоящие из электромагнитных волн, не отклоняются. Земля, как все мы знаем, окружена своим магнитным полем: земля представляет нечто вроде магнита, полюса которого расположены вблизи географических полюсов земли. Магнитное поле земли очень слабое, а поэтому оно может

заметно искривить путь очень быстрой заряженной частицы только в том случае, если такая частица пройдет в магнитном поле земли достаточно длинный путь — по крайней мере в несколько тысяч километров. Если первичные космические лучи состоят из электромагнитных волн, а быстрые заряженные частицы, которые производят совпадения показаний счетчиков в опытах Боте-Кольхерстера, возникают только в земной атмосфере на высоте нескольких километров от поверхности земли, то магнитное поле земли не успеет заметно искривить их путь. Иное дело, если заряженные частицы возникают не в самой атмосфере, а приходят к земле издалека: в этом случае магнитное поле земли будет действовать на них на всем своем протяжении, а потому пути этих частиц искривятся довольно сильно. Что будет в результате? Ответ на этот вопрос можно извлечь из одного очень простого опыта, который еще в прошлом столетии проделал норвежец Биркеланд. Биркеланд взял стальной шарик и намагнитил его, так что на нем получились два магнитных полюса — северный и южный. Этот шарик представлял собой миниатюрную модель земли. Шарик был обмазан флюоресцирующим веществом и помещен в разрядную трубку, в которой от катода шли катодные лучи. И что же? Оказалось, что намагниченный шарик искривил эти катодные лучи и притянул их к себе, но так, что электроны катодных лучей могли попадать на шарик только вблизи его магнитных полюсов: флюоресцирующее вещество у полюсов шарика начинало светиться под ударами электронов, а вся поверхность вокруг экватора оставалась темной. То же самое действие должен был бы оказывать и земной шар на заряженные частицы первичных космических лучей, если бы в этих первичных лучах действительно были заряженные частицы: они должны были бы падать на землю преимущественно вокруг полюсов, а поэтому у земных магнитных полюсов интенсивность космических лучей была бы заметно больше, чем у экватора.

Вопрос о распределении интенсивности космических лучей по разным местам поверхности земного шара был окончательно решен в 1933 году. Американский физик Артур Комптон, собрав и обработав огромный материал наблюдений, произведенных многочисленными экспедициями в разных географических широтах, пришел к следующему заключению: между магнитными полюсами и широтой, равной приблизительно  $45^\circ$ , интенсивность космических лучей постоянна. Но при продвижении от широты  $45^\circ$  к экватору интенсивность космических лучей уменьшается и достигает на самом экваторе значения, которое составляет 86% от интенсивности космических лучей на полюсах. Таким образом, наличие заметного действия магнитного поля земли совершенно несомненно. Ясно, что первичные лучи состоят (по крайней мере отчасти) из заряженных очень быстрых частиц.

Что же это за частицы? Наиболее прямым и многообещающим способом исследования этих частиц является способ камеры Вильсона. В 1929 году ленинградский физик Д. В. Скобельцын, наблюдая в камере Вильсона пути электронов, вырванных из электронных оболочек атомов под действием проходящих через камеру гамма-лучей радиоактивных веществ, обнаружил, наряду с путями таких электронов, также и пути заряженных частиц, которые несомненно имели совершенно иное происхождение. Камера Вильсона, которой пользовался Скобельцын, была помещена в магнитное поле напряжением в 1500 гаусс (сила или напряжение магнитного поля измеряется особыми единицами — гауссами). Поэтому пути электронов, вырванных гамма-лучами из электронных оболочек атомов, заметно искривлялись в этом магнитном поле: вместо прямых линий были кружки. Но наряду с этими дугами и кружками на фотографиях Скобельцына были также отчетливо видны и прямые линии, которые очевидно представляли собой пути частиц настолько быстрых, что магнитное поле в 1500 гаусс ничего не могло сделать с ними и не искривило их пу-

тей сколько-нибудь заметным образом. Когда Скобельцын убрал прочь от камеры Вильсона то радиоактивное вещество, из которого излучались гамма-лучи, то эти прямолинейные пути, не желавшие изогнуться в магнитном поле, все-таки продолжали появляться. Значит они совсем не связаны с лучами радиоактивных веществ. Появляются они совсем нерегулярным образом: если сделать наудачу расширение в камере Вильсона, то прямолинейный путь то появится, то нет. На 1700 фотографических снимках, которые снял Скобельцын, было найдено 179 таких прямолинейных путей.

Скобельцын совершенно правильно объяснил эти пути так: это пролетают через камеру Вильсона несущиеся с огромной скоростью заряженные частицы космических лучей (вероятно, электроны). Замечательно, что на фотографиях Скобельцына иногда наблюдалась сразу пара таких прямолинейных путей, реже наблюдалась сразу тройка, а один раз была даже четверка путей. Так как фотоснимки производились стереоскопические, то Скобельцын мог видеть, что эти пары, тройки и четверки состояли из путей, вовсе не случайно попавших на одну фотографию, а тесно связанных друг с другом: эти пути при их мысленном продолжении назад, за камеру Вильсона, пересекались друг с другом (например, наблюдаемая Скобельцыным четверка состояла из прямого ствола, от которого отделялись три тоже прямолинейные ветви). Отсюда Скобельцын заключил, что быстрая частица космических лучей, проходя через воздух или через другие вещества, порождает новые быстрые частицы — повидимому электроны, вышибаемые ею из атомов вещества.

Магнитное поле в 1500 гаусс, которое применял Скобельцын, было совершенно недостаточно для того, чтобы искривить пути этих весьма быстрых частиц космических лучей. Но в 1932 году двум физикам, работавшим совершенно независимо друг от друга, удалось сконструировать приборы, в которых камера Вильсона помещалась в настолько сильном магнит-

ном поле, что большинство путей частиц космических лучей уже заметно искривилось. Этими физиками были П. Кунце (в немецком городке Росток) и Карл Д. Андерсон (Пасадена, в Калифорнии). Они применяли магнитное поле от 20 000 до 25 000 гаусс. В этом магнитном поле искривились пути даже и тех частиц, которые не хотели заметно изменить направление своего движения в поле 1500 гаусс в опытах Скобельцына. Но вот какой неожиданный факт открыли Кунце и Андерсон: пути частиц, пересекавших камеру вертикально, отклонялись в разные стороны — одни вправо, другие влево. Если только сделать то предположение, что частицы, оставляющие в камере вертикальный след, движутся обязательно в направлении сверху вниз, то станет ясно: пути, изогнувшиеся в одну сторону, принадлежат частицам, заряженным отрицательно, а пути, изогнувшиеся в другую сторону, — частицам, заряженным положительно. Самое простое предположение, какое только можно было сделать об этих частицах, заключалось в том, что отрицательно заряженные из них — это электроны, а положительно заряженные — протоны. Такое предположение и сделали Кунце и Андерсон. И вместе с тем, измерив величину искривления этих путей в магнитном поле, которое было в камере Вильсона, они смогли вычислить скорость и энергию движения этих электронов и протонов. Оказалось, что заряженные частицы космических лучей движутся с различными энергиями, но все эти энергии группируются около некоторой средней величины — примерно около миллиарда электрон-вольт. Это показывает, что в космических лучах мы имеем дело с энергиями еще во много раз большими, чем энергии, освобождающиеся при распаде радиоактивных ядер.

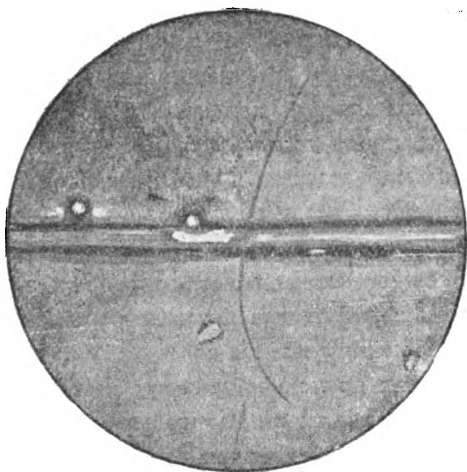
В августе 1932 года Андерсон сделал открытие огромной важности. Он стремился получить возможность узнавать по какому направлению двигалась заряженная частица, оставившая в камере Вильсона след своего движения. Дело в том, что если на фотографическом снимке имеется какой-то изогнут-

шийся в магнитном поле след, то всегда имеются две возможности: или по этому пути двигалась положительно заряженная частица в одном направлении, или же двигалась отрицательно заряженная частица в противоположном направлении. Если мы знаем направление движения по данному пути, то из того, в какую сторону путь искривляется в магнитном поле, можно узнать была ли частица, оставившая след, положительно заряженной или отрицательно заряженной. Обыкновенно, когда в камере Вильсона заснят вертикальный след, то самое естественное допущение заключается в том, что частица космических лучей оставила этот след, двигаясь не снизу вверх, а сверху вниз. Но все-таки в этом никогда не может быть окончательной уверенности. Поэтому Андерсон сделал так: он перегородил свою камеру Вильсона свинцовой пластинкой. Съемка производилась в магнитном поле, и в том случае, когда заснятый след пересекал свинцовую перегородку, проходя через нее насквозь, всегда оказывалось так, что по одну сторону свинцовой перегородки искривление пути в магнитном поле было сильнее, чем по другую. Так как магнитное поле тем сильнее искривляет путь частицы, чем медленнее частица движется, то ясно, что направление движения частицы было от той стороны камеры, где искривление было меньше, к той стороне камеры, где искривление больше: ведь, пересекая перегородку, частица должна была обязательно уменьшить свою скорость (торможение при переходе через перегородку). Значит, поставленная в камере свинцовая перегородка дает средство узнать, в какую именно сторону происходило движение по заснятому на фотографическом снимке пути, а следовательно и узнать, был ли заряд частицы отрицательным или положительным.

Так вот, в августе 1932 года, рассматривая один из таких снимков с перегороденной камерой Вильсона, Андерсон сделал следующее неожиданное открытие: на снимке был след движения частицы, заряженной положительно, и Андерсон

сперва подумал, было, что это протон. Но, сделав предположение, что эта частица имела вес протона, Андерсон мог, по кривизне пути в магнитном поле, определить скорость, а значит и энергию движения этого протона. По этой энергии движения протона можно было заключить, что протон с такой энергией должен пробежать в камере Вильсона столько-то сантиметров, пока его энергия совершенно не израсходуется на образование ионов вдоль всего этого пути. Но к великому удивлению Андерсона путь, который положительно заряженная частица прошла после того, как пересекла перегородку, был в несколько раз больше, чем тот, который она могла бы пройти, будь она протоном. Значит эта частица была совсем не протоном. Необходимо было так подобрать ее вес, чтобы ее энергия, вычисленная из ее веса и из искривления пути в магнитном поле, как раз позволила бы ей пройти именно тот путь, который она прошла в действительности.

Андерсон вычислил, сколько должна весить такая частица.



Снимок в камере Вильсона, перегороженной свинцовой пластинкой (Андерсон, 2 августа 1932 г.) Этот снимок впервые дал доказательства существования позитрона.

Заснятый след показывает, что частица проходит сверху вниз и что ее скорость уменьшается после прохождения через пластинку (кривизна пути увеличивается). Направление кривизны показывает, что заряд положителен. Если допустить, что частица — протон, то из величины кривизны оказывается, что ее энергия после прохождения через пластинку равна 300 тысячам электрон-вольт. Такой протон потерял бы свою энергию после 5 мм пути. Между тем действительная длина следа, измеренная по фотографии (с учетом изменения размеров при фотографировании), составляет 5 см. Противоречие исчезает, если допустить, что частица не протон, а позитрон. Окончательный вывод из анализа снимка: позитрон с энергией 63 миллиона электрон-вольт пересек слой свинца и вышел из него с энергией 23 миллиона электрон-вольт.

Магнитное поле было равно 15 тысячам гаусс.



Оказалось, что ее вес должен быть равен весу электрона. Но ведь заряжена то она не отрицательным зарядом, а положительным, как протон. Значит, приходилось заключить, что в своей камере Вильсона Андерсон наблюдал совершенно новый вид частиц, невиданный и неслыханный прежде: след, оставленный в камере Вильсона и заснятый на его фотографии, принадлежал частице, у которой был положительный заряд, как у протона, но вес гораздо меньший, чем вес протона, а именно вес электрона.

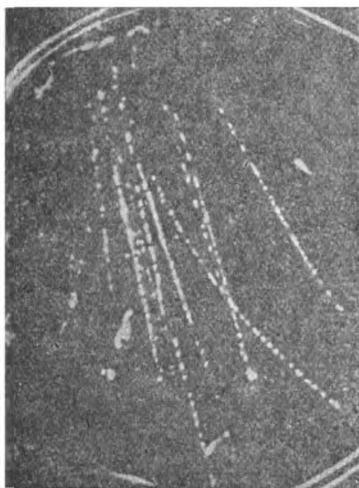
Так был выслежен положительный электрон, о существовании которого физики даже и не догадывались раньше. Фотография в камере Вильсона позволила открыть совершенно новый сорт частиц, с которым физики в своих опытах по искусственному расщеплению ядер никогда прежде не сталкивались. Совершенно таким же образом, как сыщик выслеживает преступника по отпечатку, случайно сделанному его влажным пальцем, — так же и физик сумел по отпечатку пути в камере Вильсона заключить о свойствах частиц, с которыми он раньше никогда не имел дела.

Повидимому у Андерсона не хватило достаточной смелости для того, чтобы объявить о своем открытии во весь голос: должно быть он сомневался в правильности своего наблюдения. Это видно из того, что он не опубликовал сделанного им снимка ни в одном серьезном научном журнале. Правда, в американском научно-популярном журнале «Science» («Наука») Андерсон поместил коротенькую заметку (без фотографического снимка), в которой он сообщил о сделанном им открытии положительного электрона, но в течение нескольких месяцев читатели научных журналов тщетно ждали дальнейших подробностей. Подробностей не было, откуда все заключили, что Андерсон очевидно уже сам усумнился в своем открытии и жалеет о напечатанной короткой заметке.

Как раз в это время в Кэвендишевской лаборатории ученик Резерфорда П. М. С. Блэккетт производил, совместно

с молодым итальянским физиком Дж. П. С. Оккиалини, временно проживавшим в Кэмбридже, серию новых замечательных опытов с космическими лучами. Блэккетт и Оккиалини придумали одно новое и весьма существенное усовершенствование в способах работы с камерой Вильсона. Дело в том, что во всех предыдущих исследованиях космических лучей в камере Вильсона приходилось производить расширение камеры наудачу, и не всегда на фотографическом снимке оказывался след движения быстрой заряженной частицы космических лучей. Обыкновенно на большей части снимков ничего не было, потому что как раз в тот момент, когда производилось расширение камеры, быстрая частица, связанная с космическими лучами, могла и не проходить через прибор. В опытах Скобельцына из десяти фотографий было девять «пустых», т. е. не содержащих следов очень быстрых частиц; в опытах Андерсона было даже 49 пустых фотографий из пятидесяти. (Каждую минуту через один квадратный сантиметр проходит в среднем 1,5 быстрых частиц космических лучей; процент пустых фотографий сильно зависит от размеров, расположения и конструкции камеры Вильсона). Такой огромный процент «пустых» фотографий сильно затрудняет работу с камерой Вильсона. Поэтому Блэккетт и Оккиалини решили применить вот какой фокус: они поставили камеру Вильсона между двумя счетчиками Гейгера-Мюллера и применили особое автоматическое устройство, которое приводило поршень камеры Вильсона в движение всякий раз, как ионизационный ток шел сразу через оба счетчика. В тот же самый момент автоматически производилось и фотографирование содержимого камеры. При этом 80% снимков уже не были «пустыми». Это более или менее естественно: ведь одновременный ионизационный ток в обоих счетчиках может иметь место (если не считать той случайности, что через счетчики одновременно пройдут две независимые друг от друга частицы) главным образом тогда, когда одна и та же быстрая заряженная частица прони-

зывает сразу оба счетчика (как в опытах Боте и Кольхерстера с совпадениями). Но в этом случае та же самая частица должна обязательно пройти через камеру Вильсона и быть авто-



Фотография „ливня“ по Блэккетту и Оккиалини.

Ливень содержит около 16 отдельных следов. Следы слегка искривлены — одни в одну сторону, другие в другую. Большая часть почти прямых следов расходится из одной общей точки, расположенной в обмотке соленоида, но сильнее изогнутые следы расходятся из другого центра, лежащего несколько ниже. Магнитное поле равнялось 3100 гаусс. Фотографический аппарат был расположен так, что его ось была в точности параллельна полю.

матически заснятой, потому что одновременная работа обоих счетчиков вызывает расширение камеры и фотографирование. Благодаря этому остроумному устройству количество удачных (не «пустых») снимков смогло быть увеличено во много раз по сравнению с работой других исследователей, и, хотя в распоряжении Блэккетта и Оккиалини было не очень сильное магнитное поле (немногим больше 2000 гауссов), им все же удалось получить гораздо более интенсивные результаты, чем это удавалось всем другим исследователям. (По этому поводу заметим, что Кэвендишевская лаборатория, которая является ведущей в области ядерной физики, совсем не обладает особенно богатыми техническими

средствами. Этим, в частности, объясняется, что Блэккетт и Оккиалини могли воспользоваться в своих опытах только сравнительно скромным магнитным полем: ценность физических открытий определяется не только техническими средствами, имеющимися в распоряжении экспериментатора, но и его остроумием и способностью получить максимум результатов с по-

мощью минимума средств. В этом отношении Кэвендишевская лаборатория стоит, вероятно, на первом месте).

Из 700 фотографий, заснятых Блэккетом и Оккиалини, пустых было менее двухсот. Что касается удачных фотографий, то 75% из них имело очень простой вид: на каждой из них просто виднелся след движущейся заряженной частицы, настолько быстрой, что магнитное поле в 2000 гаусс не могло искривить этот след сколько-нибудь заметным образом. Но на некоторых фотографиях было видно сразу несколько путей. Было получено 18 фотографий, на каждой из которых зафиксировано больше 8 частиц космических лучей, и 4 фотографии с числом следов более 20.

Блэккетт и Оккиалини описывают эти фотографии следующими словами:

«Самая замечательная характеристная черта, общая многим фотографиям с большим количеством следов, — это то, что на них встречаются «ливни», т. е. группы, состоящие из нескольких следов, исходящих из некоторой области где-нибудь внутри материала стенок камеры и чаще всего расходящихся книзу.

Иногда такая группа следов представляется расходящейся из одной единственной точки; иногда же удастся установить наличие сразу двух или большего числа таких центров; наконец, нередко попадаются шальные следы, не имеющие явного отношения к главным группам.



Тот же самый ливень, что и на предыдущей фотографии, но заснятый аппаратом, ось которого была под углом  $20^\circ$  к магнитному полю.

Оба снимка составляют стереоскопическую пару.

У большинства путей, образующих эти ливни, нет заметного искривления магнитным полем в 2000 гаусс. Когда такой ливень частиц низвергается в камеру, он тут и там вызывает к жизни дополнительные центры излучения. Об этом свидетельствуют фотографии в тех случаях, когда поперек камеры ставилась пластинка, внутри которой и появлялись новые центры. Тогда иной раз можно наблюдать, как частица, обладающая огромной энергией, как бы отбрасывается назад — в направлении, чуть ли не противоположном падающему ливню».

Среди частиц, составлявших ливень, некоторые оставляли в камере след, заметно искривившийся в магнитном поле. Направление движения частицы по этой кривой было совершенно очевидно: частицы, составляющие ливень, должны двигаться от той точки или от того небольшого объема, откуда ливень расходится. А так как некоторые частицы изгибали свой путь в магнитном поле вправо, а другие влево, то нужно было сделать заключение, что в числе частиц, входящих в состав ливня, есть не только отрицательно заряженные, но и положительно заряженные. А длина следа, оставленного в камере Вильсона такой положительно заряженной частицей, ясно указывала на то, что эта частица, как и в описанном выше опыте Андерсона, не могла обладать весом протона: в этом случае следы получались бы короче и жирнее. Положительно заряженные частицы, входящие в состав ливней, должны были обладать весом электрона.

На фотографиях Блэккетта и Оккиалини было в общей сложности 14 следов, анализ которых показывал, что они должны принадлежать частицам, имеющим вес электрона, но заряд протона.

Таким образом Блэккетт и Оккиалини, как за несколько месяцев перед тем Андерсон, натолкнулись на существование частиц, которые отличаются от электрона только знаком своего заряда, но не весом.

Вскоре статья Блэккетта и Оккиалини, в которой они подробно описывали свои опыты и к которой они приложили копии своих фотографий, появилась в журнале лондонского «Королевского Общества» (так называется в Англии общество ученых, играющее там ту же роль, что у нас Академия Наук). Статья эта произвела огромную сенсацию среди физиков (на заметку Андерсона, появившуюся за несколько месяцев перед тем в мало распространенном «Science», почти никто не обратил внимания). Все физики должны были поверить в «положительные электроны», о существовании которых раньше никто и не подозревал.

После появления статьи Блэккетта и Оккиалини Андерсон, наконец, тоже опубликовал свои фотографические снимки. Он же предложил и особое название для «положительного электрона», а именно предложил называть его «позитрон», предложив название «электрон» в исключительное пользование прежнему, давно известному отрицательному электрону. Название позитрон довольно неуклюже (греческое окончание приставлено к латинскому корню), но тем не менее физики согласились называть так найденные Андерсоном, Блэккетом и Оккиалини новые частицы.

Число позитронов среди тех следов, образующих ливень, которые заметно отклоняются в магнитном поле, приблизительно равно, как оказалось у Блэккетта и Оккиалини, числу электронов среди тех же следов. Поэтому Блэккетт и Оккиалини заключили, что ливни, вероятно, состоят из одинакового числа электронов и позитронов. Что же такое эти ливни и как они возникают?

На этот вопрос физика до сих пор не может ответить категорически. Из опытов Блэккетта и Оккиалини ясно только то, что ливни вызываются каким-то неионизирующим (т. е. проходящим через камеру Вильсона, не ионизируя, и поэтому не оставляя следа) агентом, причем если в одном каком-нибудь месте произошел ливень, то вероятность появления ливня

где-нибудь по соседству заметно увеличивается. Таким образом один ливень как бы вызывает появление других ливней, хотя от того места, где был первый ливень, к тем местам, где появились рядом с ним новые ливни, не идет никакого пути, который мог бы быть сфотографирован в камере Вильсона. Значит и здесь прошел все тот же таинственный «неионизирующий агент». О том, что же эта за невидимка-агент, вызывающий ливни, до сих пор ничего не известно.

Ливни появляются преимущественно в тех местах, где имеется какое-нибудь плотное массивное вещество, например, кусок металла. Поэтому ясно, что ливни образуются, повидимому, при действии «неионизирующего агента» космических лучей на атомные ядра.

Блэккетт и Оккиалини описывают появление ливней такими словами:

«Ливни зарождаются, повидимому, в любом веществе, окружающем камеру, безразлично в каком. С того момента, как наша камера была окружена соленоидом с медной обмоткой, большинство ливней стало возникать в меди, но часть центров излучения находится также и в стеклянных стенках и крышке камеры, в алюминии поршня и в воздухе комнаты. Когда поперек камеры вставлялась пластинка из свинца или из меди, появлялись группы следов, расходящихся из точек внутри пластинки.

Интересно произвести грубый подсчет, сравнив число ливней в единицу времени с общим количеством атомных ядер в веществе, окружающем камеру. Одно совпадение между двумя счетчиками наблюдалось в среднем каждые две минуты, а один ливень с числом путей, превосходящим 8 штук, приблизительно через каждые тридцать совпадений. Иными словами один ливень фотографировался в среднем за один час. Почти все ливни излучались из центров, расположенных преимущественно в одной определенной части обмотки соленоида над самой камерой. Эта часть обмотки заключала в себе приблизи-

тельно 10 кг<sub>р</sub> меди. Принимая, что только один из пяти ливней, разразившихся в меди, заставляет одновременно работать оба счетчика, мы получаем, что один ливень возникает в 10 кг<sub>р</sub> меди в среднем за каждые 10 минут.

Если мы допустим, что ливни действительно вызываются невидимым даже при посредстве камеры Вильсона «неионизирующим агентом» при его действии на атомные ядра, то возможны разные дальнейшие допущения. Возможно, что само ядро при возникновении ливня совсем не изменяется и что оно только преобразует таинственный неионизирующий агент, превращая его в дождь электронов и позитронов. Иными словами ядро играет роль прибрежной скалы, о которую разбиваются морские волны, превращающиеся при этом в мелкую рябь. Или же, наоборот, «неионизирующий агент» разрушает атомные ядра, и ливень электронов и позитронов — это те осколки, которые летят во все стороны от разрушаемого атомного ядра или его разрушаемой части (например, нейтрона или протона). В этом случае пришлось бы допустить, что космические лучи, непрерывно в течение миллионов и миллиардов лет бомбардирующие нашу землю, производят медленное разрушение атомных ядер в ней и вызывают, таким образом, превращение одних элементов в другие. Быстроту этого разрушения ядер легко оценить, взяв за исходный пункт цифру, приведенную Блэккеттом и Оккиалини: один ливень на 10 кг<sub>р</sub> меди за 10 минут. В 10 кг<sub>р</sub> меди имеется  $9,5 \cdot 10^{25}$  атомов меди. В секунду разрушается один из  $9,5 \cdot 10^{25} \cdot 10 \cdot 60 = 5,7 \cdot 10^{28}$  атомов меди. Значит продолжительность жизни атома меди должна быть величиной порядка  $10^{28}$  сек., т. е. порядка  $10^{21}$  лет. Отсюда следует, что даже если космические лучи и разрушают атомные ядра химических элементов, то даже за сроки, сравнимые с возможной продолжительностью жизни планет и звезд, это разрушение не приведет к особенно заметным результатам.

Как бы то ни было, появление ливней, вероятно, играет



огромную роль в механизме поглощения космических лучей. В чем эта роль заключается теперь еще толком неизвестно. Возможно, что дальнейшее изучение ливней прольет свет на природу космических лучей и на способ и место их возникновения. В настоящее время космические лучи являются одной из самых мучительных загадок в физике. Весьма возможно, что в первичных лучах существуют электроны и позитроны, возможно также, что там есть и протоны и даже, как фантазируют некоторые физики, «отрицательно заряженные протоны». (Если нашлись «положительно заряженные электроны», то почему не найтись, в конце концов, и «отрицательно заряженным протонам»? Пока, впрочем, их никто еще никогда не наблюдал). Но из чего состоит остальная масса первичных космических лучей, что такое «неионизирующий агент», повидимому вызывающий появление ливней, и откуда вообще космические лучи берутся, — на все это пока нет ответа. Но в этой книжке, посвященной атомам и ядрам, космические лучи играют сравнительно второстепенную роль. Мы только потому ввели космические лучи в наш рассказ, что именно из исследования космических лучей физики впервые узнали о существовании позитронов — нового сорта основных частиц вещества. На дальнейших страницах нашего рассказа космические лучи со всеми их загадками уже появляться не будут.

Открытие позитронов в ливнях космических лучей вызвало целый поток новых физических открытий. Прежде всего позитронами занялся знаменитый английский теоретик П. А. М. Дирак. Мы здесь не будем подробно рассказывать его теорий: они настолько трудны и глубокомысленны, что для их понимания необходимо иметь гораздо больше знаний, чем имеет читатель, для которого написана эта книжка. Поэтому мы расскажем только тот результат, до которого додумался Дирак, не сообщая каким именно образом он до него додумался. Дирак, не производя никаких опытов, а рассуждая исключительно теоретически, заявил: «позитроны не могут

быть долговечны. Всякий позитрон, столкнувшийся с электроном, взаимно уничтожается вместе с ним, превращаясь при этом в гамма-лучи». Это утверждение Дирака в высшей степени замечательно: до того времени никто никогда не наблюдал такого странного явления, что заряженные частицы уничтожаются, превращаясь в гамма-лучи, и физик, пожалуй, мог бы применить к электронам и протонам то, что когда-то Дальтон сказал об атомах, а именно, что их так же невозможно создать или уничтожить, как невозможно создать или уничтожить планету в солнечной системе. Но из теории Дирака выходило, что электроны и позитроны могут взаимно уничтожаться и что при этом возникают гамма-лучи<sup>1</sup>. Легко рассчитать, пользуясь соотношением Эйнштейна, какая энергия гамма-лучей возникает при этом. Ведь при уничтожении электрона и позитрона должна исчезнуть их масса, равная  $1,8 \cdot 10^{-27}$  гр (вдвое больше массы одного электрона, которая равна  $9,03 \cdot 10^{-28}$  гр). По Эйнштейну каждый грамм уменьшения массы соответствует появлению  $5,65 \cdot 10^{32}$  электрон-вольт энергии. Поэтому при уничтожении электрона и позитрона ( $1,8 \cdot 10^{-27}$  гр) должен выделяться 1 миллион электрон-вольт энергии в виде гамма-лучей. Теория Дирака позволяет также рассчитать и длину волны этих гамма-лучей.

Но не только превращение

электрон + позитрон  $\rightarrow$  гамма-лучи

---

<sup>1</sup> Тут нужно сделать вот какое замечание: некоторые думают, что предположение о возможности превращения позитронов и электронов в гамма-лучи противоречит материализму. Это неверно. Электроны—это одна из форм материи, позитроны — другая, гамма-лучи (и вообще электромагнитные волны и поля) — третья. Ведь материя есть то, что реально существует и может восприниматься нашими органами чувств (непосредственно или при посредстве научных приборов). Поэтому ясно, что электромагнитные поля (значит в том числе и волны света, лучей Рентгена, гамма-лучей и т. д.) — это тоже некая разновидность материи. Но ведь ничего бессмысленного и противоречащего материализму нет в том, что одни формы материи (электроны и позитроны) превращаются в другие формы (в гамма-лучи).

является возможным на основании теории Дирака. Должно быть возможным также и обратное превращение, а именно:

гамма-лучи  $\rightarrow$  электроны  $+$  позитроны.

Для того, чтобы такое превращение было возможным, учит теория Дирака, в нем обязательно должны участвовать атомные ядра. Эти атомные ядра сами не подвергаются при этом никакому изменению, но их присутствие необходимо для того, чтобы гамма-лучи могли превратиться в электроны и позитроны. И при этом чем больше у атомного ядра заряд, тем более оно способствует гамма-лучам испытать такое превращение. Полный электрический заряд (алгебраическая сумма всех электрических зарядов) никогда не изменяется, поэтому каждый вновь возникающий позитрон возникает обязательно вместе с электроном: заряд позитрона равен заряду электрона с обратным знаком, так что алгебраическая сумма их зарядов равна нулю. Иными словами, возникновение новых частиц всегда происходит в виде пар: под действием гамма-лучей возникают в присутствии атомных ядер (преимущественно тяжелых, т. е. с большим атомным весом и зарядом) «пары», каждая из которых состоит из одного электрона и одного позитрона.

Все это покамест только чистая теория, теоретические предсказания Дирака. Но как проверить правильность предсказания на опыте? На этот счет Дирак дал следующее указание.

Экспериментаторы уже в течение нескольких лет наблюдали и измеряли поглощение гамма-лучей в разных веществах. Они обнаружили, что в веществах с большим атомным весом (а значит и с большим зарядом атомных ядер) гамма-лучи поглощаются заметно сильнее, чем в веществах с небольшим атомным весом. Причины этого явления никому не были известны. Так вот Дирак указал на то, что причина вероятно такая: гамма-лучи, проходя вблизи ядер с большим зарядом, гораздо чаще превращаются в пару (электрон  $+$  позитрон),

чем проходя мимо ядер с малым зарядом. На такое превращение в электрон + позитрон затрачивается энергия гамма-лучей (по тому же правилу Эйнштейна требуется затратить миллион электрон-вольт, чтобы создать такую «пару», весящую  $1,8 \cdot 10^{-27}$  г). Поэтому когда гамма-лучи проходят мимо тяжелых ядер, которые согласно теории Дирака больше способны превращению

гамма-лучи  $\rightarrow$  электрон + позитрон,

чем легкие ядра, то дополнительная часть энергии гамма-лучей затрачивается на такие превращения, и следовательно гамма-лучи должны поглощаться сильнее, чем тогда, когда они проходят через вещества с небольшим атомным весом. Вот почему в свинце, например, гамма-лучи поглощаются сильнее (процентов на тридцать), чем в воде или углероде. Эти добавочные тридцать процентов, — это как раз та часть энергии гамма-лучей, которая идет на образование «пар».

Но какова дальнейшая судьба этих пар? С одним членом пары — с электроном — все обстоит нормально; что с ним делается? Он будет двигаться до тех пор, пока не пристанет, например, к какому-нибудь атому. Иное дело позитрон. Ведь по теории Дирака позитроны недолговечны: позитрон, например, медленно движущийся через атмосферный воздух, должен по вычислениям Дирака, погибнуть от столкновения с электроном в среднем через  $3 \cdot 10^{-7}$  сек, а если это не воздух, а какое-нибудь более плотное вещество, где электронов в каждом кубическом сантиметре больше и следовательно опасность столкновений тоже больше, то средняя продолжительность жизни позитрона в соответственное число раз уменьшится. Поэтому позитрон, возникший вместе с электроном, будет иметь другую судьбу. Он будет двигаться до тех пор, пока не столкнется где-нибудь с электроном и не уничтожится вместе с ним, испуская гамма-лучи. Это уничтожение позитрона произойдет где-нибудь поблизости от того места, где он

возник, и поэтому то же самое тело, которое обладает добавочным поглощением гамма-лучей (например, кусок свинца по сравнению с куском угля или льда того же самого веса), будет наряду с этим также испускать во все стороны другие гамма-лучи, а именно те, которые будут выделяться при уничтожении позитронов. Теория Дирака в точности предсказывает, какая длина волны должна быть у этих гамма-лучей.

Незадолго до открытия позитрона и появления теории Дирака английские физики Грей и Тэррент в Кэвендишевской лаборатории действительно наблюдали такие гамма-лучи, испускаемые свинцом и другими веществами с большим атомным весом в то самое время, как они поглощают гамма-лучи. Длина волны этих испускаемых гамма-лучей была точь в точь такая, какой она должна быть на основании теории Дирака.

Таким образом теория Дирака очень хорошо подтвердилась на опыте. Но этого не достаточно. Хорошо бы и суметь непосредственно пронаблюдать, например в камере Вильсона, как гамма-лучи превращаются в пару (электрон + позитрон).

Первые опыты, показавшие, что позитроны не только сами зарождаются в ливнях, вызываемых космическими лучами, но что их можно получать и искусственно, пользуясь одними лишь земными средствами, — первые такие опыты произвели Чэдвик, Блэккетт и Оккиалини. Они взяли препарат, состоявший из смеси полония с бериллием. Полоний, как мы знаем, испускает альфа-частицы, которые, действуя на атомные ядра бериллия, заставляют их испускать нейтроны и гамма-лучи.

Чэдвик, Блэккетт и Оккиалини подносили препарат полония и бериллия к камере Вильсона, внутри которой был расположен свинцовый экранчик. Этот свинцовый экранчик подвергался действию лучей, шедших от препарата полония и бериллия. При расширении камеры Вильсона оказалось, что от свинцового экранчика расходятся во все стороны пути от-

рицательно и положительно заряженных частиц. То, что заряды были действительно разные, было видно из того, что в магнитном поле одни пути искривлялись в одну сторону, а другие в другую. Судя по всему, частицами, расходящимися во все стороны от свинцового экранчика, были электроны и позитроны.

Значит свинцовый экранчик под действием лучей, шедших от препарата полония и бериллия, испускал электроны и позитроны. Однако, этот опыт не вполне чист, потому что бериллий под действием альфа-лучей полония испускает и гамма-лучи и нейтроны, а поэтому неясно, что именно — гамма-лучи или нейтроны — заставляет свинец испускать эти электроны и позитроны.

Более чистые опыты были проделаны другими исследователями. Ирен Кюри и Фредерик Жолио в Париже, Майтнер и Филипп в Берлине, Андерсон и Недермейер в Пасадене, в одно и то же время и совершенно независимо друг от друга, показали, что чистые гамма-лучи, испускаемые торием С", вызывают появление позитронов, если освещать ими свинцовую пластинку.

Вот как описывает свои опыты Ф. Жолио:

«В наших опытах, — пишет он, — свинцовая пластинка, помещенная внутрь камеры Вильсона, подвергалась действию пучка гамма-лучей тория С", прошедших сквозь фильтр в 3 см свинца. Отношение числа положительных электронов в этих опытах к числу отрицательных оказалось равным 8%. На некоторых наших фотографиях можно заметить два электронных пути: один принадлежит положительному электрону, другой отрицательному электрону, причем оба пути начинаются в одной и той же точке поверхности свинцовой пластинки. Снимок, воспроизведенный здесь рядом, изображает очень редкий случай, когда точка, в которой возникают оба электрона — положительный и отрицательный — находится внутри газа, наполняющего камеру Вильсона. Измеряя кривизну пу-

тей, можно вычислить, что сумма энергий обоих электронов немного меньше, чем  $1,6 \cdot 10^6$  электрон-вольт».

Таким образом в полном согласии с предсказанием Дирака удалось наблюдать превращение гамма-лучей в положительный и отрицательный электроны.



„Пара“, состоящая из электрона и позитрона, созданная в газе внутри камеры Вильсона действием гамма-лучей тория С”.

На снимке видны два пути, исходящие из одной и той же точки и искривленные магнитным полем в разные стороны.

А как обстоит дело с обратным превращением, с превращением электрона и позитрона в гамма-лучи?

Это превращение наблюдали впервые Ирен Кюри и Ф. Жолио. Они поступили так: поток позитронов, возникавших при действии гамма-лучей на свинец, падал на металлическую пластинку, рядом с которой находился счетчик, очень чувствительный именно по отношению к гамма-лучам.

Когда на пластинку падал поток электронов, счетчик не показывал ничего. Но как только на ту же пластинку начинал падать такой же поток позитронов, счетчик начинал считать, т. е. показывать, что на него падают гамма-лучи, производящие ионизацию газа в его камере. Значит при прохождении позитронов через металлическую пластинку действительно испускались гамма-лучи. Это были те самые лучи, которые должны испускаться при столкновении и взаимном уничтожении электрона и позитрона.

Свойства позитронов и свойства электронов, согласно теории Дирака, совершенно симметричны друг с другом. Они отличаются друг от друга только тем, чем в алгебре отличаются положительные числа от отрицательных. И если позитроны недолговечны, а электроны долговечны, то это не потому, что позитрон, взятый сам по себе, менее долговечен, чем электрон, взятый сам по себе. Просто, электронов на свете гораздо больше, чем позитронов, а так как при встрече электрон и позитрон взаимно уничтожаются, то когда позитроны уже все уничтожились, электроны еще остаются.

«Продолжительность жизни позитрона, — говорит Дирак, — достаточно велика для того, чтобы в наших опытах позитроны успевали проходить через камеру Вильсона, не уничтожаясь по дороге, и вместе с тем она настолько мала, что позитроны, вследствие своей недолговечности, не могут стать столь же обыкновенным и повседневным предметом наблюдения в лаборатории, как отрицательные электроны».

Взаимное уничтожение позитрона и электрона, превращающихся при этом в гамма-лучи, и обратное превращение гамма-лучей в пару (электрон и позитрон) напоминает одно пророческое место в «Оптике» Исаака Ньютона, написанной больше двухсот лет тому назад. Ньютон говорит: «Природа любит превращения. Среди разнообразных и многочисленных превращений, которые она делает, почему бы ей не превращать тела в свет и свет в тела?»



Гамма-лучи — это, по существу, свет, хотя и с гораздо более короткой длиной волны, чем тот свет, который мы видим глазами. Электроны и позитроны — это частицы, т. е. тела, в том смысле, в каком мы привыкли употреблять это слово. (Электроны, к тому же, входят в состав всех окружающих нас обыденных тел).

Поэтому превращение

$$\text{гамма-лучи} \rightarrow \text{электрон} + \text{позитрон}$$

и

$$\text{электрон} + \text{позитрон} \rightarrow \text{гамма-лучи},$$

это и есть превращение света в тела и тел в свет.

Так, через два века с лишним сбылась гениальная фантазия Ньютона.

## Глава девятая

### ИСКУССТВЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА

В 1933 году Ирен Кюри и Фредерик Жолио открыли следующее явление: если альфа-частицы сталкиваются с ядрами алюминия, то из этих ядер вылетают не только протоны, что открыл уже Резерфорд, и не только нейтроны (испускание нейтронов алюминием под действием альфа-лучей полония наблюдалось целым рядом исследователей, и прежде всего, самими Кюри и Жолио). Ядра алюминия под обстрелом альфа-лучей испускают также и позитроны. Такое испускание позитронов алюминием Кюри и Жолио наблюдали с помощью камеры Вильсона. Мы приводим здесь один из сделанных ими снимков: жирный след принадлежит протону, вышибленному альфа-частицей из



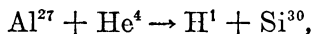
Протон (жирный след) и позитрон (тонкий изогнутый магнитным полем след), выбитые из алюминия действием альфа-лучей (по Ф. Жолио).

ядра алюминия (реакция открытая Резерфордом), а тонкий след, изогнувшийся в магнитном поле, — позитрону, выбитому из другого ядра алюминия. Испускаемые нейтроны, конечно, не видны на фотографии, потому что нейтрон сам не оставляет следа в камере Вильсона.

Количество испускаемых позитронов довольно значительно: один позитрон испускается примерно на один или на два миллиона альфа-частиц.

Испускание позитронов наблюдалось не только при обстреле алюминия альфа-частицами, но также и при обстреле ими бериллия и бора.

Этим явлениям Жолио дал следующее объяснение: при захвате альфа-частицы ядром алюминия, есть две возможности: или ядро алюминия, поглотив альфа-частицу, испускает из себя протон по формуле



или же оно испускает не протон, а нейтрон и позитрон. Что остается в результате этой второй реакции? Если мы обозначим остающееся ядро буквой  $x$ , то уравнение



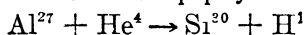
решается так: атомный вес слева будет  $27 + 4 = 31$ , справа же нейтрон дает 1, а позитрон 0 (ведь при вычислении целочисленных весов весом электрона или позитрона можно пренебречь), значит на ядро  $x$  остается  $31 - 1 = 30$ ; что касается заряда, то для Al он равен 13, для He — 2, для нейтрона — 0, для позитрона — 1, значит на ядро  $x$  остается заряд  $13 + 2 - 1 = 14$ . Иными словами это будет кремний. Итак, вторая из двух возможностей, по объяснению Жолио, будет



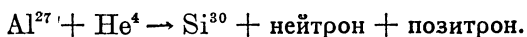
Если это мнение Жолио справедливо, т. е. если действительно нейтрон и позитрон вылетают парой из одного из того же

ядра, то в результате выбивания нейтрона и позитрона из  $\text{Al}^{27} + \text{He}^4$  остается то же, что остается после выбивания протона. В этом нет ничего удивительного потому, что у нейтрона + позитрона такой же самый общий заряд и такой же общий целочисленный атомный вес, как у протона.

Поэтому из сравнения обеих формул



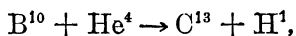
и



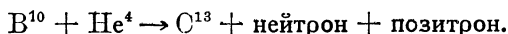
Жолио вывел заключение о том, что протон является сам по себе сложной частицей, а не простой, как считали раньше и что протон состоит из нейтрона и позитрона. Это мнение Жолио, высказанное им в 1933 году, представляет огромный интерес вот в каком отношении: с тех самых пор, как Астон установил, что атомные веса всех ядер близки к целым числам, физики считали, что основными «кирпичами мироздания» являются протоны и электроны. Ядро, характеризуемое числами  $M$  (целое число, близкое к атомному весу) и  $Z$  (заряд ядра, выраженный в зарядах протона), трактовалось, как состоящее из  $M$  протонов и  $(M - Z)$  электронов. Нейтрон же, открытый в 1932 году, всегда можно было рассматривать, как ядро, характеризуемое числами  $M = 1$ ,  $Z = 0$  (т. е. как бы ядро химического элемента  $Z = 0$ ); поэтому с точки зрения того взгляда, что все состоит из протонов и электронов, нейтрон можно было считать состоящим из одного протона и одного электрона. В 1933 году, после открытия Блэккетта и Оккиалини, к двум этим видам «кирпичей мироздания» (протонам и электронам) пришлось прибавить третий вид — позитроны, но убеждение в том, что нейтрон есть сложная частица, состоящая из двух простых — протона и электрона, — должно было остаться в силе (ведь явления бета-распада, как мы видели, истолковываются как распад одного из нейтронов ядра на электрон и протон. Но явление, открытое Жолио, допускает совершенно другое истолкование:

оно наводит на мысль о том, что не протоны являются простыми частицами, а нейтроны и что протон есть сложная частица, состоящая из двух простых: нейтрона и электрона. Таким образом наряду с прежней точкой зрения, согласно которой протон является одним из основных «кирпичей мироздания», появилась и новая точка зрения, приписывающая эту роль не протону, а нейтрону. В этой же главе мы увидим, что произошло в результате столкновения этих двух точек зрения.

Совершенно аналогичным образом Жолио объяснил испускание позитронов бором. При захвате альфа-частицы ядром бора может произойти или реакция



которую наблюдал уже давно Резерфорд, или реакция

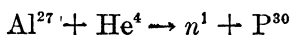


Окончательный продукт ( $\text{C}^{13}$ ) в обоих случаях одинаковый.

В январе 1934 года те же самые ученые — Фредерик Жолио и его жена Ирен Кюри — обнаружили совершенно новый неожиданный факт: если обстреливать алюминий альфа-частицами и наблюдать испускаемые при этом позитроны, а затем внезапно убрать источник альфа-лучей, то испускание позитронов прекращается совсем не сразу. Оно продолжается — правда, убывая при этом в геометрической прогрессии: через  $3\frac{1}{4}$  минуты оно уменьшается вдвое, еще через  $3\frac{1}{4}$  минуты уменьшается еще вдвое и т. д. и т. д. Иными словами, оно убывает по тому же самому закону, по которому убывает излучение радиоактивных веществ.

Отсюда Жолио заключил: позитроны испускаются вовсе не сразу после того, как ядро алюминия захватило альфа-частицу. Сперва испускаются только нейтроны, но после захвата альфа-частицы и испускания нейтрона ядро алюминия превращается в ядро какого-то нового радиоактивного вещества. Это ядро нового радиоактивного вещества распадается, имея

продолжительность жизни 3 минуты 15 секунд. Но только распад его не такой, как бывает у обычных радиоактивных элементов, т. е. не альфа-распад и не бета-распад; с ним происходит распад, заключающийся в самопроизвольном испускании позитрона. Для этого распада очень легко высказать «правило сдвига», которое следует присоединить к обоим правилам сдвига Фаянса-Содди: при испускании позитрона атомный вес (целочисленный) остается неизменным, а порядковый номер в периодической системе уменьшается на единицу, так как позитрон почти не уносит с собой массы, но уносит из ядра один положительный элементарный заряд. Каковы же формулы ядерных реакций? Сперва при захвате альфа-частицы и испускании нейтрона происходит реакция:



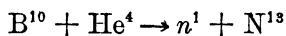
(где  $n^1$  обозначает нейтрон, а  $\text{P}^{30}$  новый, никому до тех пор неизвестный изотоп фосфора; правильность этой формулы контролируется тем, что  $27 + 4 = 1 + 30$  и  $13 + 2 = 0 + 15$ ). Ядро  $\text{P}^{30}$  — это и есть радиоактивное ядро, обладающее продолжительностью жизни 3 минуты 15 секунд и испускающее при своем распаде позитрон. Согласно новому правилу сдвига, оно при этом превращается в ядро с тем же приближенным атомным весом 30 и с порядковым номером  $Z = 15 - 1 = 14$ , иными словами в ядро кремния. Поэтому формула такого распада имеет вид



Таким образом  $\text{Al}^{27} + \text{He}^4$  распадаются в конце концов на нейтрон + позитрон +  $\text{Si}^{30}$ , как Жолио и толковал этот распад с самого начала, но только распад происходит не сразу, как Жолио думал раньше, а в два приема — через посредство нового радиоактивного изотопа фосфора  $\text{P}^{30}$ . Это новое вещество было получено в опытах Жолио искусственно; оно совсем не встречается среди атомов фосфора, которые существ-

вуют в природе в готовом виде и могут быть исследованы в масс-спектрографе. Новое искусственное вещество — изотоп «фосфор тридцать» Жолио назвал «радиофосфором», чтобы отметить его радиоактивные свойства.

Совершенно аналогично обстоит дело и при обстреле бора альфа-частицами. Если источник альфа-лучей убрать, то испускание позитронов прекращается не сразу, а убывает в геометрической прогрессии, уменьшаясь вдвое каждые 14 минут. Это можно истолковать так: при захвате альфа-частицы ядро бора испускает сперва нейтрон по формуле

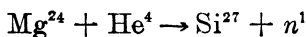


(контроль формулы:  $10 + 4 = 1 + 13$ ;  $5 + 2 = 0 + 7$ ). Получается новое вещество «радиоазот» — так Жолио назвал этот никому до того неизвестный и не встречающийся в природе изотоп «азот тринадцать». Радиоазот есть радиоактивное вещество с продолжительностью жизни четырнадцать минут, распадающееся с испусканием позитрона. На основании правила сдвига в результате распада должно возникнуть ядро с тем же атомным весом 13, но с зарядом  $7 - 1 = 6$ , т. е. ядро «углерода тринадцать». Итак

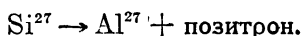


В результате распада  $\text{B}^{10} + \text{He}^4$  получают те же самые частицы (ядро  $\text{C}^{13}$ , нейтрон и позитрон), как думал Жолио с самого начала, но только распад происходит не сразу, а через посредство промежуточного искусственно-созданного вещества — «радиоазота».

Третий случай того же рода, исследованный Жолио, был такой: альфа-частицами полония облучался магний. Испускание позитронов после того, как полоний был уже убран, прекращалось не сразу, а убывало вдвое каждые 2,5 минуты. Формулы реакций таковы: сперва происходит реакция



(контроль формулы:  $24 + 4 = 27 + 1$ ;  $12 + 2 = 14 + 0$ ). Изотоп «кремний двадцать семь» не принадлежит к числу известных и изученных в масс-спектрографе изотопов кремния. Это—новое вещество, искусственно созданное впервые в опытах Жолио. Оно радиоактивно и обладает продолжительностью жизни 2,5 минуты. Испуская позитрон, оно должно, согласно правилу сдвига, превращаться в ядро с атомным весом 27 и с порядковым номером  $14 - 1 = 13$ . Иными словами ядро «радиокремния» (так назвал его Жолио) превращается в обыкновенное ядро «алюминия двадцать семь» по формуле



Таким образом Жолио удалось искусственно создать три новых радиоактивных вещества «радиофосфор», «радиоазот», «радиокремний». Это был первый (но как мы увидим не последний) случай искусственного создания новых радиоактивных веществ.

Количества этих искусственных веществ, созданных в опытах Жолио, были исчезающе малы. По его приблизительным подсчетам число атомов каждого из этих веществ в состоянии равновесия с имевшимся в лаборатории Кюри-Жолио препаратом полония было не больше 10 000. Десять тысяч атомов! — это совершенно ничтожное количество вещества, и если бы это были не радиоактивные вещества, то никакой известный физике или химии способ анализа не был бы в состоянии их обнаружить (десять тысяч атомов «радиоазота» весят около  $2 \cdot 10^{-19}$  гр, т. е. в пять миллиардов миллиардов раз меньше одного грамма). Но Жолио осмелился применить к этим ничтожным количествам искусственных веществ методы обыкновенной химии и тем самым определить химическую природу этих веществ. Идея Жолио (заимствованная им из аналогичных опытов с обыкновенными радиоактивными элементами, например с радием А, В, С, т. е. с «активным осадком», выпадающим из эманации радия) состояла в том, что при обра-

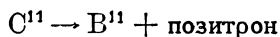
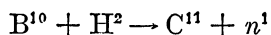


ботке, например, алюминия, обстреливаемого альфа-частицами, с помощью какого-нибудь химического препарата, способного отделить от алюминия фосфор, вся позитронная активность перейдет к этому препарату, и ее можно будет таким образом «смыть» с алюминия. Этим будет доказано, что источник позитронов действительно обладает химическими свойствами фосфора (разумеется нужно, чтобы реакция происходила достаточно быстро по сравнению с теми несколькими минутами, в течение которых «радиофосфор» распадается).

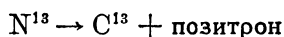
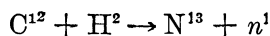
Приведем один пример такого химического анализа, произведенного Жолио: он обстреливал альфа-лучами полония соединение бора с азотом. Затем к этому соединению приливался едкий натр, и смесь нагревалась. При этом происходила химическая реакция, в результате которой получался аммиак ( $\text{NH}_3$ ). И вот оказалось, что позитронная радиоактивность уносится прочь вместе с аммиаком. Аммиак, в котором уже нет бора, продолжал испускать позитроны.

Опыты Жолио произвели глубокое впечатление на всех физиков. И сейчас же в других физических лабораториях во всем мире стали усиленно изучать создание новых искусственных радиоактивных веществ. Американские физики, воспользовавшись тем, что в их распоряжении были и самые большие количества тяжелой воды и самые мощные установки для создания потоков быстрых ионов, стали создавать новые радиоактивные вещества, применяя бомбардировку не альфа-частицами, а диплонами (ядрами тяжелого изотопа водорода). Гендерсон, Ливингстон и Лоренс бомбардировали диплонами с энергией в 3 миллиона электрон-вольт ряд веществ, а именно углерод, борную кислоту, алюминий, магний, бериллий, фтористый кальций, хлористый кальций и др. При этом получалось испускание позитронов, которое после прекращения дипломной бомбардировки убывало вдвое в течение следующих промежутков времени: в случае бомбардировки углерода в течение 12 минут, в случае борной

кислоты — 20 минут, алюминия — 3 минуты, магния — 9 минут; в случае бериллия наблюдались две группы позитронов, испускание которых убывало с разными продолжительностями жизни: 9 минут и 3 минуты; при бомбардировке фтористого кальция продолжительность жизни была 40 секунд, при бомбардировке хлористого кальция — 13 секунд, а в случае фосфорнокислого натрия, углекислого лития и азотно-кислого аммония — 20 минут. Первые две из перечисленных реакций (обстрел диплонами борной кислоты и углерода) объясняются следующим образом (мы приводим одни только формулы, так как читатель уже, вероятно, хорошо научился их читать и проверять их согласие с правилами сдвига):



( $\text{C}^{11}$  — это «радиоуглерод» с продолжительностью жизни около 20 минут). Вторая реакция

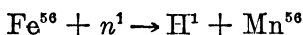


(«радиоазот»  $\text{N}^{13}$  получен здесь иным способом, чем его получил Жолио, но распадается он таким же самым темпом: 14 минут была его продолжительность жизни по измерениям Жолио, 12 минут по измерениям американских физиков. Различие между двумя этими числами невелико и, как потом выяснилось, объясняется неизбежной неточностью измерений.

Таким образом и в работах американских физиков подтвердилась правильность чудесного открытия Жолио: возможно искусственно создавать новые радиоактивные вещества, которых не существует в природе. Заметим, что Жолио одним ударом убил сразу двух зайцев, а именно он тем же самым открытием еще и доказал, что кроме альфа-распада и бета-распада может существовать еще и третий вид радиоактивного распада — распад ядра с испусканием позитрона,

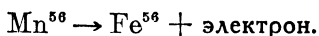
Весной 1934 года итальянский физик Энрико Ферми открыл иной вид искусственной радиоактивности. В отличие от позитронной активности, которую открыл Жолио, это — электронная радиоактивность, т. е. обыкновенный бета-распад. Ферми нашел, что многие химические элементы при их обстреле нейтронами становятся источниками испускания электронов, причем это испускание после прекращения обстрела спадает со временем в геометрической прогрессии. Химическое исследование совершенно такого же рода, как описанный выше химический анализ Жолио, показало, что порядковый номер в периодической таблице элементов у того вещества, которое испускает электрон, большей частью бывает на единицу ниже, чем порядковый номер вещества, подвергаемого нейтронной бомбардировке. Это значит, что при захвате нейтрона из ядра вылетает протон (протоны не наблюдались непосредственно, но их вылет обязательно должен происходить, так как понижение порядкового номера на единицу доказывается химически, — если только вылетают не диплоны). Приведем два примера.

Пример первый: нейтронами обстреливается железо. Наиболее распространенным изотопом железа является «железо пятьдесят шесть». Если нейтрон захватывается ядром, а вместо него вылетает протон, то атомный вес (приближенный целочисленный) измениться не может, так как у нейтрона и у протона атомный вес одинаков. Но порядковый номер должен уменьшиться на единицу, потому что вошедший нейтрон не вносит в ядро никакого заряда, а вылетевший протон уносит с собой один положительный элементарный заряд. Так как у железа  $Z = 26$ , то из железа должен получиться марганец ( $Z = 25$ ). Итак первая часть реакции такова:



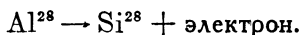
«Марганец пятьдесят шесть» или «радиомарганец» не принадлежит к числу известных изотопов марганца, встречаю-

щихся в природе. Он радиоактивен, обладает продолжительностью жизни 2 часа и распадается, испуская электрон. При этом, по обыкновенному правилу сдвига Фаянса-Содди, его вес должен попрежнему оставаться 56, а порядковый номер в периодической таблице элементов снова увеличивается на 1, т. е. из марганца ( $Z=25$ ) он должен снова стать железом ( $Z=26$ ). Итак



Таким образом, в результате обеих реакций  $\text{Fe}^{56}$  снова превратилось в  $\text{Fe}^{56}$ , но нейтрон превратился в протон и электрон.

Пример второй: при обстреле нейтронами кремния ( $Z=14$ ) начинается испускание электронов, которое после прекращения обстрела убывает вдвое каждые три минуты. Химическое исследование показывает, что такой бета-активный элемент обладает химическими свойствами алюминия ( $Z=13$ ). Поэтому формулы ядерных реакций должны быть такие:



Радиоактивным элементом оказывается здесь «алюминий двадцать восемь» или «радиоалюминий». В результате обеих следующих друг за другом реакций  $\text{Si}^{28}$  снова превратился в  $\text{Si}^{28}$ , но вместо исчезнувшего нейтрона появились протон и электрон.

По данным Ферми, если пользоваться источником нейтронов, дающим в секунду  $10^6$  нейтронов с энергией около 2 миллионов электрон-вольт, то искусственный радиоактивный элемент, находящийся в равновесии с этим источником нейтронов, дает от 100 до 200 электронов в секунду. Количество электронов оказывается почти одинаковым, несмотря на то, что например «радиомарганец» распадается в 40 раз медленнее, чем «радиоалюминий». Это объясняется тем, что вслед-

ствие медленности распада радиомарганца количество атомов радиомарганца успеет накопиться больше, чем количество атомов радиоалюминия в таком же самом опыте.

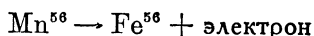
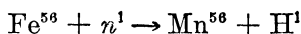
Блестящие открытия Жолио и Ферми показали, что возможно искусственно получить радиоактивные элементы, продолжительность жизни которых настолько велика, что с ними возможно успеть произвести химические реакции. В настоящее время во всех физических лабораториях повторяют и внимательно изучают эти опыты Жолио и Ферми. Количество искусственных радиоактивных элементов, известных теперь, уже превышает количество известных естественных радиоактивных элементов. Опыты с искусственной радиоактивностью (в том числе и химические опыты с искусственными радиоактивными веществами) настолько просты, что их можно легко демонстрировать на лекциях (электроны и позитроны регистрируются счетчиком). Удивительно, что эти простые и важные явления могли остаться незамеченными до 1934 года. Впрочем, так часто бывает: после многих важных открытий людям приходилось удивляться, как эти простые вещи могли так долго оставаться никому неизвестными. Понадобилось около тридцати пяти лет после открытия радия и полония для того, чтобы заметить, что посредством этих веществ можно сделать радиоактивными алюминий, магний и ряд других обыкновеннейших веществ.

Изучая искусственную радиоактивность, возникающую при бомбардировке атомных ядер нейтронами, Ферми заметил, что особенно сильное действие вызывают не быстрые нейтроны, а медленные, — например нейтроны полония-бериллия, растерявшие свою скорость при прохождении через несколько сантиметров парафина или воды. Такие нейтроны «прилипают» к большинству атомных ядер (без выбрасывания протона), и в результате этого возникают новые радиоактивные (бета-активные) изотопы.

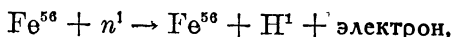
Заметим, что в числе различных опытов, которые произ-

водил Ферми, была и бомбардировка нейтронами урана ( $Z=92$ ). При этом происходили разные весьма сложные явления (более сложные, чем при бомбардировке легких элементов нейтронами), и Ферми даже высказал подозрение, что в числе продуктов распада есть и элемент с порядковым номером  $Z=93$ . Хан и Майтнер (в Берлине) проверили предположение Ферми. Оказалось, что оно правильно. При бомбардировке урана и тория нейтронами возникают новые радиоактивные элементы и даже целые династии радиоактивных элементов. Среди этих радиоактивных элементов есть и элементы с порядковыми номерами 93, 94 и 95. Так были искусственно созданы «заурановые» химические элементы, — элементы, которых пока еще никто не нашел в природе. (Разумеется, возможность создать их в лаборатории делает чрезвычайно вероятным предположение, что они существуют и в природе, например в недрах звезд).

Чему же учат нас явления искусственной радиоактивности? Прежде всего, они показывают, к каким странным противоречиям приводит вопрос о том, является ли протон сложной частицей, состоящей из нейтрона и позитрона, или же нейтрон является сложной частицей, состоящей из протона и электрона. Противоречия эти таковы: если рассмотреть реакцию Ферми

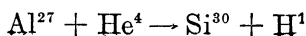


то легко понять, что она в конечном счете сводится к реакции

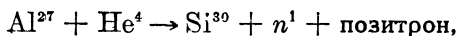


т. е. нейтрон распался на протон и электрон. Значит нейтрон состоит из протона и электрона.

С другой стороны, сравнивая реакцию Резерфорда



с реакцией Жюлио



мы убеждаемся в том, что отнятие протона у  $\text{Al}^{27} + \text{He}^4$  приводит совершенно к таким же результатам, как отнятие нейтрона и позитрона. Значит протон состоит из нейтрона и позитрона.

Получается странное противоречие.

К такому же противоречию приходишь, когда просто сравниваешь явление радиоактивного бета-распада с распадом, сопровождающимся испусканием позитронов. Если считать, что атомные ядра состоят из нейтронов и протонов, то бета-распад, сопровождающийся испусканием электрона, можно объяснять так: нейтрон распался на электрон и протон; электрон ушел прочь, а протон остался. Явление же распада с испусканием позитронов можно понимать так: протон распался на нейтрон и позитрон; позитрон ушел прочь, а нейтрон остался. Поэтому явление испускания электронов радиоактивными ядрами заставляет нас притти к заключению, что нейтрон есть сложная частица, а явление испускания позитронов, открытое Жюлио, заставляет притти к заключению, что сложной частицей является протон.

В чем разгадка этого противоречия? Как может быть, что из двух физических явлений вытекают следствия, которые так резко противоречат друг другу?

Очевидно все дело в том, что мы пытаемся насильно втиснуть явления природы в какую-то узкую заранее придуманную нами схему. Мы до сих пор привыкли иметь дело с частицами, которые ведут себя, как кубики из детского строительного ящика: они перемещаются в пространстве, образуя различные комбинации; и нам по привычке кажется, что протон или нейтрон либо не состоит из частей, либо состоит из них совершенно таким же образом, как игрушечный домик состоит из кубиков. В действительности это не так. В мире

ничтожно-малых частиц, из которых состоят атомы и их ядра, все происходит не таким привычным для нас способом. Природа как бы насмехается над нашими привычками. Она наделила позитроны и электроны совершенно необычной способностью — уничтожаться и возникать вновь. Поэтому ядерные явления разрушают ту логику, которой мы научились, пользуясь детскими кубиками. Если нейтрон распадается на протон и электрон, то это совсем не значит, что нейтрон уже заранее был комбинацией протона и электрона, тесно прижатых друг ко другу. Мы будем гораздо разумнее, если отбросим логику детского строительного ящика и скажем, что нейтрон имеет способность превращаться в протон и электрон, а протон способен превращаться в нейтрон и позитрон.



## Глава десятая

### НЕЙТРИНО?

Неопытные в физике люди обыкновенно бывают очень сильно удивлены, когда им приходится слышать, что среди современных физиков еще могут быть какие-то сомнения в абсолютной правильности закона сохранения энергии. Если кто-нибудь начинает сомневаться в абсолютной правильности этого закона, то ему обыкновенно приходится слышать самые разнообразные возражения, начиная с того, что закон сохранения энергии подтвержден всей человеческой практикой и кончая тем, что отрицание абсолютной правильности закона сохранения энергии есть мистика и идеализм.

Правильно ли это?

Для того, чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, как закон сохранения энергии возник и какова его история.

Начиная со второй половины XVI столетия среди механиков была очень популярна задача: построить «перпетуум мобиле» (вечный двигатель), т. е. машину, которая не нуждается ни в заводе, ни в топливе, но все-таки беспрерывно совершает все новую и новую работу. После каждого цикла она возвращается в первоначальное состояние и готова вновь работать, как работала только-что.

Перпетуум мобиле был заветной мечтой нарождавшейся тогда промышленной буржуазии. Перпетуум мобиле — это механическая аналогия цветущего капиталистического предприятия, оставляющего после каждого своего цикла все новую и новую прибыль в руках хозяина,

Еще в первой половине XVIII века вечным двигателем интересовались все. Русский царь Петр Первый намеревался купить за большие деньги колесо, построенное неким Орфиреусом в Германии: это колесо было, якобы, вечным двигателем (в действительности колесо Орфиреуса было жульнической проделкой: оно приводилось в движение человеком посредством спрятанного в стене механизма).

Постепенно механики и физики отчаялись в возможности построить такую машину, порождавшую любые количества энергии «из ничего» — совершенно таким же образом, как отчаялись и в излюбленной задаче алхимиков, задаче превращения элементов. Но только в середине XIX века стала понятна настоящая причина неудачи всех попыток построить перпетуум мобиле.

Причина эта заключается в том, что существует закон сохранения энергии: энергия может изменять свою форму, но не может уничтожаться или вновь возникать из ничего.

Закон сохранения энергии был проверен в необыкновенно широкой области физических явлений и всюду оказывался правильным.

После того, как был установлен этот физический факт, началась работа философов. Они хотели философски осмыслить закон сохранения энергии и дать ему, помимо физических, еще и философские основания.

Философы всегда более или менее точно отражали идеологию правящего класса (в данном случае буржуазии). Как же справились они со своей задачей здесь? Перпетуум мобиле, золотой сон промышленного капитала в эпоху его юности, теперь был забыт и осмеян. Перпетуум мобиле теперь стал казаться даже чем-то предосудительным. Ведь эта машина, если бы она оказалась возможной, могла бы позволить людям жить не работая — страшные слова для слуха буржуа, всю жизнь привыкшего заставлять других людей работать.

Закон сохранения энергии импонировал душе буржуа также

и своей эстетической стороной: ведь он делает природу так похожей на то, что кажется добрпорядочному буржуа самой красивой вещью на свете — на аккуратную бухгалтерскую книгу, где подведен баланс с точностью до одной копейки.

Поэтому философы провозгласили закон сохранения энергии чем-то абсолютно обязательным и необходимым. «Ничего не рождается из ничего». «Ничего не делается даром» — вот те философские пошлости, на которых основано это мнение.

Как же должен относиться к закону сохранения энергии материализм — философия пролетариата?

Материализм не признает догматов. Закон сохранения энергии был проверен и подтвержден в огромнейшей области физических явлений. Но если физика выходит за пределы этой области явлений и начинает заниматься новыми явлениями, которые не входили в рассмотрение до сих пор, то существует ли обязательно необходимость в том, чтобы закон сохранения энергии оказался верен и там? Можем ли мы заранее предъявить к природе такое требование, чтобы ни одно физическое явление, входящее в эту новую еще неизученную область явлений, не могло быть использовано для осуществления вечного двигателя? Ясно, что таких требований мы предъявлять не должны. Мы не должны считать, что если у нас сложилась привычка наблюдать только такие явления, по отношению к которым закон сохранения энергии верен, то он уже обязан быть верным всегда и всюду. Природа не обязана всегда потакать нашим привычкам, нашим сложившимся представлениям. Природа, как мы уже говорили по другому поводу, издевается над нашими привычками.

Из всего этого следует: по отношению к закону сохранения энергии материалисты не должны сохранять никаких предвзятых точек зрения. Закон сохранения энергии до сих пор подтверждался в широчайшей области физических явлений. Но физика открывает нам все новые и новые области явлений. И каждую из них мы должны заново исследовать и,

в частности, узнавать — применим ли к ней закон сохранения энергии или нет. Если окажется, что в какой-нибудь из них закон сохранения энергии не выполняется, то это будет значить, что природа оказалась разнообразнее, свободнее и богаче, чем мы о ней привыкли думать. Ведь вот в течение многих лет ученые относились почти как к догмату к тому, что химические элементы не могут превращаться друг в друга. И это было действительно верно, но только в пределах какой-то определенной области явлений. В предыдущих главах этой книжки мы узнали о том, как физики вышли за пределы этой области явлений, как они открыли превращение химических элементов, происходящее в природе и как затем они даже научились в некоторой степени управлять этим превращением и вызывать его по своему желанию.

Как знать, может быть, что-нибудь похожее на это случится и с законом сохранения энергии?

После всех этих вступительных замечаний перейдем снова к самой конкретной физике. Рассмотрим то физическое явление, которое заставило некоторых физиков в последнее время усомниться во всеобщей правильности и универсальной применимости закона сохранения энергии.

Это явление связано с бета-лучами. Если пропустить пучок электронов, вырывающихся из атомных ядер при бета-распаде, через магнитное поле, то самые быстрые из этих электронов испытывают самое маленькое отклонение от первоначального прямолинейного пути, а самые медленные — самое большое, и следовательно весь пучок электронов развернется в виде веера. Поэтому на фотографической пластинке, поставленной за этим магнитным полем, изображение оставленное бета-лучами развернется в спектр бета-лучей. (Не следует смешивать этот спектр со спектром лучей света, например с солнечным спектром: спектр световых лучей располагается в порядке изменения длины волны, а в спектре бета-лучей — в порядке изменения скорости электронов). Изучая «бета-

спектры», физики обнаружили следующую закономерность: в бета-спектре каждого данного радиоактивного вещества, подвергающегося бета-распаду, встречаются электроны разнообразных энергий, начиная от самых маленьких и кончая некоторой совершенно определенной максимальной энергией, которая определяет верхнюю границу бета-спектра. Значит, вообще говоря, в бета-спектрах встречаются электроны не одной только энергии, а очень различных энергий. Примером может служить спектр бета-лучей радия Е. Этот спектр содержит электроны всевозможных энергий, начиная от очень маленьких и кончая энергией в 1,05 миллионов электрон-вольт. Измеряя число электронов с тем или иным значением энергии, можно вычислить, что средняя энергия электрона, выбрасываемого ядром радия Е, составляет всего лишь 0,39 миллиона электрон-вольт.

У физиков с самого начала возникло сомнение: а верно ли, что электроны действительно вылетают из ядер, обладая с самого момента вылета различными энергиями и скоростями? Ведь очень могло бы быть, что при вылете все электроны имеют полную энергию 1,05 миллиона электрон-вольт, но сейчас же после вылета многие из них теряют часть своей энергии на столкновения с другими электронами, с атомами, на испускание гамма-лучей и т. п. И поэтому, когда мы в конце концов перехватываем их магнитным полем и заставляем развернуться всеором и упасть на фотографическую пластинку, то оказывается, что только немногие электроны сохранили первоначальную энергию 1,05 миллиона электрон-вольт, а громадное большинство электронов успело растерять энергию, кто больше, кто меньше.

Эту гипотезу в 1927 году решили проверить физики Эллис и Вустер (в Кэвендишевской лаборатории). Они решили сделать так: поместить некоторое количество радия Е в калориметр, который смог бы поглотить все электроны, выпущенные радием Е, и затем по повышению температуры этого калори-

метра измерить количество полученной им энергии. Если верно, что электроны уже при выходе из ядра имеют очень разные энергии, группирующиеся вокруг среднего значения 0,39 миллиона электрон-вольт, то количество энергии, полученное калориметром, окажется равным произведению 0,39 миллиона электрон-вольт на число ядер, успевших распасться. (Число распадающихся в секунду ядер взятого препарата радия Е может быть измерено предварительно, например, подсчетом числа вылетающих в секунду электронов). Если же все электроны в момент выхода имеют максимальную энергию 1,05 миллиона электрон-вольт, которую лишь затем они теряют на столкновения, испускание гамма-лучей и т. п., то потерянная ими энергия тоже ведь успеет в калориметре превратиться в тепло (это значит, что энергия, полученная от вылетевших электронов какими-нибудь электронами или атомами, успеет распределиться между всеми атомами калориметра; стенки калориметра поглотят и гамма-лучи, испущенные при этом и т. д.). А поэтому полная энергия, полученная калориметром, будет равна произведению числа распавшихся ядер не на 0,39, а на 1,05 миллиона электрон-вольт. Измерив энергию калориметра, можно будет судить о том, какая из двух гипотез справедлива.

Осадок радия Е откладывался на короткой платиновой или никелевой проволочке. Эта проволочка помещалась в тонкий латунный футляр и могла легко вставляться и выниматься из калориметра, который состоял из свинцовой трубочки с толщиной стенок чуть больше одного миллиметра, так что все бета-лучи в нем поглощались. Наряду с этим калориметром в приборе был еще и другой, совершенно такой же, как первый, но лишь с той разницей, что на вставленной туда проволочке не было налета радия Е. Оба калориметра помещались совершенно симметрично (для того чтобы все внешние температурные влияния действовали на них одинаково) в массивный медный футляр. Между обоими калориметрами через некото-

рое время устанавливалась разность температур, которая измерялась системой термоэлементов, присоединенной к чувствительному гальванометру.

В результате этих опытов оказалось, что энергия, получаемая калориметром в среднем на одно распавшееся ядро радия Е, была равна 0,35 миллиона электрон-вольт. Это число настолько близко к средней энергии электрона в бета-спектре (0,39 миллиона электрон-вольт), что разность между ними легко объясняется возможными погрешностями измерения. Во всяком случае оно не равно максимальной энергии электрона в бета-спектре, которая составляет, как мы говорили, 1,05 миллионов электрон-вольт.

Значит, опыты Эллиса и Вустера совершенно недвусмысленно решают вопрос в пользу того, что бета-электроны уже при вылете из радиоактивного ядра обладают самыми разнообразными энергиями.

Когда этот результат опытов стал известен, то между физиками начался жестокий спор о том, что бы это могло означать. Ведь когда радиоактивное ядро подвергается бета-распаду, (например, когда ядро радия Е превращается в ядро радия F), то при этом оно из какого-то совершенно определенного начального состояния переходит в какое-то совершенно определенное конечное состояние: все ядра радия Е в точности похожи друг на друга и, следовательно, обладают одной и той же совершенно определенной энергией; и таким же образом все ядра радия F в точности похожи друг на друга и, следовательно, обладают одной и той же совершенно определенной энергией. Поэтому, когда ядро радия Е превращается в ядро радия F, то при этом должна освобождаться некоторая совершенно определенная энергия, которая передается вылетающему из ядра электрону, — совершенно таким же образом как энергия, освобождающаяся при горении данного заряда взрывчатого вещества, передается вылетающему из орудия снаряду. Можно предположить, например,

что при превращении ядра радия Е в ядро радия F энергия уменьшается на 1,05 миллиона электрон-вольт. Но почему же не все вылетевшие из ядра электроны уносят с собой эту энергию? Почему это делают только некоторые, немногие электроны, а большинство электронов уносят с собой меньше энергии, чем потеряло ядро? И куда же девается остаток?

Два знаменитых физика пытались ответить на эти вопросы. Одним из них был Нильс Бор (в Копенгагене), другим — В. Паули (в Цюрихе).

Ответ Бора был неожидан и прост. При бета-распаде радиоактивных ядер, утверждал Бор, происходит нарушение закона сохранения энергии. Ядро радия Е, превращаясь в ядро радия F, переходит из совершенно определенного начального состояния в совершенно определенное конечное, но при этом наружу отдается не одно определенное количество энергии, а разное: электрон может унести с собой всю максимальную величину — 1,05 миллиона электрон-вольт, может унести и меньше, но при этом остаток, недополученный электроном не девается никуда. Он просто пропадает без всякого следа.

Ответ Паули был хитрее. Паули заявил следующее: когда из распадающегося ядра вырывается бета-электрон, то вместе с ним всегда вылетает еще и нечто другое. Это «нечто» и электрон всегда уносят в сумме одну и ту же энергию, например, при распаде ядра радия Е энергию 1,05 миллионов электрон-вольт, — ту самую энергию, которую потеряло ядро. Если электрон возьмет себе много, то «нечто» унесет с собой мало; если «нечто» унесет с собой много энергии, то на долю электрона останется мало, но в сумме они всегда уносят одно и то же количество энергии. Закон сохранения энергии остается полностью в силе.

Что же это за таинственное «нечто», которое вылетает из ядра вместе с электронами? Ясно, что это не могут быть гамма-лучи, потому что стенки калориметра в опыте Эллиса



и Вустера поглотили бы эти гамма-лучи, и следовательно калориметр получил бы в среднем на каждое распавшееся ядро не 0,39 миллионов электрон-вольт, а заметно больше. Это не могут быть также и заряженные частицы, потому что заряженные частицы, проходя через стенки калориметра, также вступили бы в достаточно сильное взаимодействие с электронами атомов и передали бы им заметное количество энергии. Значит, это — незаряженные частицы. Но если это незаряженные частицы, то это, конечно, не могут быть нейтроны, а должны быть частицы гораздо более легкие, чем нейтроны. Это ясно по двум причинам: во-первых нейтроны, испускаемые такими радиоактивными веществами, как радий Е, были бы легко обнаружены вследствие своих столкновений с ядрами, а во-вторых при бета-распаде происходило бы чересчур заметное уменьшение атомного веса, а на самом деле оно не происходит. Итак, таинственное «нечто», вылетающее по гипотезе Паули из ядра вместе с бета-электроном, должно быть не тяжелой, а легкой незаряженной частицей — частицей, имеющей вес порядка веса электрона, а может быть и еще гораздо меньше.

Таких частиц еще никто никогда не наблюдал, но если правильно объяснение Паули, то они должны существовать. Они получили название «нейтрино» (это итальянское уменьшительное видоизменение слова нейтрон: по русски мы могли бы это перевести словом «нейтрончик» или, еще лучше, «нейтрюшка»). Калориметр в опытах Эллиса можно сравнить с рыболовной сетью, которая должна задержать все гамма-лучи, все заряженные частицы и даже значительную часть тяжелых незаряженных частиц, если бы они испускались ядром радия Е; но придуманный Паули нейтрино — это и есть та мелкая рыбешка, которая могла бы свободно проскочить через расставленную Эллисом и Вустером сеть и унести с собой недополученную электронами энергию. Возможно, что нейтрино и поглощаются где-нибудь, но только они могут

пробежать в веществе очень длинный путь перед тем, как поглотятся, растеряв свою энергию. Если, например, они поглотятся на расстоянии нескольких километров от прибора Эллиса и Вустера, то будет довольно трудно их зарегистрировать и измерить их энергию.

Итак, резюмируя, мы видим, что ответ Бора гласит: опыты Эллиса и Вустера объясняются тем, что при бета-распаде нарушается закон сохранения энергии; ответ же Паули гласит: закон сохранения энергии остается в полной силе, но должны существовать «нейтрино» — предполагаемые частицы, придуманные специально «на затычку», (т. е. для того, чтобы скомпенсировать наблюдаемые на опыте нарушения закона сохранения энергии), и наделенные такими свойствами, чтобы их было по возможности трудно обнаружить. Современная физика, в сущности, не обладает, повидимому, достаточными техническими средствами для того, чтобы обнаружить частицы, имеющие вес электрона и даже меньше, но не обладающие электрическим зарядом и потому не окруженные электромагнитным полем. Они будут проходить, как привидения, сквозь любой физический прибор, не поглощаясь в нем и, значит, не производя в нем никакого ощутимого действия.

Существуют ли нейтрино на самом деле или нет? До сих пор все попытки экспериментаторов обнаружить их существование кончались плачевной неудачей. Чэдвик и Ли (в Кэвендишевской лаборатории) на основании своих измерений (1933 г.) утверждают, что если нейтрино и существуют, то они должны проходить в воздухе, не поглощаясь, путь в 150 км или даже больше.

Поэтому спор между Бором и Паули до сих пор в физике не разрешен. Это одна из самых интересных и самых важных проблем в сегодняшней физике. Тот, кто не хочет примириться с мыслью о нарушении закона сохранения энергии при бета-распаде, должен обязательно признать существование нейтрино; с другой стороны против нейтрино говорит то сообра-

жение, что весьма невероятно существование в природе таких частиц, которые придуманы специально на затычку видимого нарушения закона сохранения энергии при бета-распаде и не несут никаких других «обязанностей», кроме этой. Но во всяком случае спор между Бором и Паули не может быть решен посредством одних лишь философских соображений; он должен быть решен и будет решен посредством физических опытов.

Вопрос о сохранении энергии имеет, разумеется, гораздо большее значение, чем можно было бы подумать на основании рассказа об этом узко специальном споре, относящемся к бета-распаду. Если бы подтвердилось мнение Бора о том, что в некоторых ядерных явлениях нарушается закон сохранения энергии, то немедленно возник бы другой вопрос — как использовать это возможное нарушение закона сохранения энергии для того, чтобы построить вечный двигатель — перпетуум мобиле, т. е. для того чтобы получать сколь угодно большие количества энергии «из ничего». Такой прибор, если бы он мог быть построен, сделался бы основой техники будущего коммунистического общества. Уже отсюда видно, какое огромное значение для всего человечества имеет этот научный спор между Бором и Паули. Следует заметить, что в последнее время все больше и больше физиков переходят на сторону существования нейтрино, т. е. уходят из лагеря «несохраненцев» в лагерь «сохраненцев».

Нильс Бор указал на то, что решение вопроса о сохранении энергии при бета-распаде будет иметь огромное значение и для решения одного из важнейших нерешенных вопросов современной науки — вопроса об источниках энергии звезд. Известно, что звезды испускают в пространство совершенно огромные, неслыханные количества энергии: так например наше Солнце испускает каждую секунду  $8,8 \cdot 10^{25}$  калорий энергии (что соответствует мощности в  $5,08 \cdot 10^{23}$  лошадиных сил). Звезда «бета Ориона», превосходящая в этом отношении все

другие звезды, испускает в секунду  $1,26 \cdot 10^{30}$  калорий, а это соответствует мощности в  $7,1 \cdot 10^{27}$  лошадиных сил. Откуда звезды берут эти огромные количества энергии, столь щедро рассылаемые ими в пространство? Что позволяет им расгочать так много и вместе с тем не гаснуть в течение огромных промежутков времени?

С давних пор астрономы пришли к заключению: звезды испускают так много тепла и света за счет каких-то огромных внутренних запасов энергии. Но, как ни велики эти запасы, все-таки и они со временем истощаются и поэтому звезды, излучая, должны все время изменяться, все время эволюционировать, переходя от состояния с очень большим количеством энергии к состоянию с меньшим количеством энергии. Мы не в состоянии заметить эту эволюцию непосредственно, потому что она совершается чересчур медленно, но тем не менее она совершается. Те разные типы звезд, которые мы видим на небе, — это различные стадии звездной эволюции. К таким взглядам астрономы пришли уже очень давно. Знаменитый астроном Вильям Гершель, прославившийся открытием планеты Уран (в конце XVIII столетия), сравнивал астронома, пытающегося разрешить вопрос об эволюции звезд, с наблюдателем, «который никогда не видел дерева, но неожиданно получил возможность провести один час в лесу. В течение этой краткой прогулки ни одна почка не развернется в лист, но наблюдатель сможет увидеть жолуди, упавшие с дуба и пустившие ростки, он увидит молодые побеги деревьев, крепкие и здоровые деревья наряду с иссохшими от старости и опаленными молнией, он увидит и рухнувшие стволы, гниющие на земле. Из всего этого наблюдатель мог бы во время своей короткой прогулки составить себе некоторое представление о рождении и смерти деревьев». Совершенно таким же образом и астроном, рассматривая различные типы звезд, мог бы составить себе представление о том, в каком направлении эволюционируют звезды в течение своей длинной

жизни, по сравнению с которой вся история человечества одно лишь мгновение.

Если мы верим в универсальную применимость закона сохранения энергии, то мы сможем получить весьма отчетливое представление о звездной эволюции, используя открытое Эйнштейном соотношение между выделением энергии и уменьшением массы. Излучая энергию, звезда должна все время уменьшаться в весе. Астрономическое исследование показало, что как ни разнообразны бывают звезды по своим свойствам — по весу, по яркости, по размерам, — тем не менее все их свойства так тесно связаны друг с другом, что все звезды одного и того же веса уже обязательно оказываются тех же самых размеров, той же самой яркости, той же самой температуры на их поверхности. Это обстоятельство позволяет расположить все звезды в один ряд, как бы по линейке, начиная от самых массивных звезд и кончая сравнительно легкими, и утверждать, что этот ряд является в то же время и эволюционным рядом: самые массивные звезды являются самыми молодыми, самые легкие — самыми старыми. Испускаемая энергия, звезды медленно передвигаются вдоль этого ряда. Сравним, например, звезду Капеллу с нашим Солнцем. Капелла весит в 3,8 раз больше, чем Солнце. Это значит, что Солнце, выйдя из той стадии, в которой теперь находится Капелла, и дожив до своего теперешнего возраста, должно было потерять вес, равный 2,8 своего теперешнего веса. Иными словами, оно потеряло  $5,5 \cdot 10^{33}$  гр. Поэтому, согласно соотношению Эйнштейна, оно должно было излучить за этот период своей жизни  $1,2 \cdot 10^{47}$  калорий лучистой энергии. А так как известно, сколько именно калорий испускают ежегодно звезды типа Капеллы, звезды типа Солнца и звезды всех промежуточных стадий, то легко вычислить, сколько лет должно было пройти от того момента, когда Солнце было похоже на теперешнюю Капеллу, до сегодняшнего дня. Ответ получается —  $6 \cdot 10^{12}$  лет. А от сегодняшнего дня до того

момента, когда Солнце будет иметь вес, равный 20% своего теперешнего веса, пройдет около  $2 \cdot 10^{15}$  лет. Таким образом закон сохранения энергии позволяет вычислять сроки эволюции звезд.

Что же является источником тех огромных количеств энергии, которые расточаются звездами? Из всех реакций, которые были рассмотрены в этой книжке, наибольшее количество энергии дает предполагаемая (еще никем не наблюдавшаяся) реакция превращения водорода в гелий. Но даже и эта энергия недостаточна для того, чтобы объяснить лучеиспускание звезд. Ведь 4,029 гр водорода превращаются в 4 гр гелия; поэтому, если бы звезда в начале своей карьеры состояла даже из одного только чистого водорода, то при превращении его в гелий она могла бы потерять всего только 0,7% своего веса, а между тем на самом деле при одном только переходе из стадии Капеллы в стадию Солнца звезда теряет больше 70% своего веса. Поэтому астрономы, для объяснения огромных количеств испускаемой звездами энергии, придумали смелую гипотезу о том, что протон и электрон могут начисто уничтожиться, превращаясь при этом в излучение — в чрезвычайно жесткие гамма-лучи. Мы уже знаем, что электрон и позитрон могут уничтожаться, превращаясь в гамма-лучи, но если это сделают протон и электрон, то количество выделенной энергии будет гораздо больше. По правилу Эйнштейна, если грамм вещества, состоящего из протонов и электронов, таким образом уничтожится, превратившись в излучение, то при этом выделится  $2,15 \cdot 10^{13}$  калорий энергии, т. е. во много раз больше, чем даже при превращении грамма водорода в гелий.

До сих пор еще никто никогда не наблюдал такого процесса (превращения протона и электрона в излучение), но так как позитрон и электрон могут превращаться в гамма-лучи, то нет ничего абсурдного в предположении, что в каких-то особенных условиях, быть может осуществляющихся в глубоких

недрах звезд, протон и электрон тоже могут это делать. (Астрономы Эддингтон и Джинс выставили гипотезу о возможности превращения протона и электрона в излучение задолго до того, как физики обнаружили явление превращения позитронов и электронов в гамма-лучи). Таким образом, по этой гипотезе, вещество звезды само себя съедает и превращаясь в излучение, медленно тает, как тает ледяная глыба.

Совсем другую гипотезу выставил Бор. Исходя из того мнения, что при бета-распаде, а может быть и при некоторых других явлениях, происходящих с атомными ядрами, нарушается закон сохранения энергии, Бор дает следующий ответ на вопрос о том, откуда берется излучаемая звездами энергия: она берется из ничего! В глубине звезды, по мнению Бора, происходят такие ядерные явления, в которых, вследствие беспрестанных нарушений закона сохранения энергии, энергия все время выделяется и вытекает наружу, хотя само вещество звездных глубин при этом несколько не изменяется. Оно все время остается таким, каким было, и его готовность испускать все новые и новые биллионы калорий энергии ничуть не уменьшается. Если эта гипотеза Бора верна, то звезды, по всей вероятности, или не эволюционируют вовсе или, во всяком случае, совсем не испускание энергии заставляет их эволюционировать.

Какая из этих двух точек зрения справедлива? Это остается до сих пор еще неразрешенной загадкой. На этой неразрешенной загадке мы и хотим закончить нашу книжку, в которой рассказано, как наука сумела разрешить многие другие загадки, не менее важные и трудные, чем эта.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<i>Глава первая</i> Загадка радиоактивности .	5
<i>Глава вторая</i> Атомы . . . . .	36
<i>Глава третья</i> Электроны и рентгеновские лучи . . . . .	84
<i>Глава четвертая</i> Разгадка радиоактивности .	118
<i>Глава пятая</i> Строение атома , . . . .	179
<i>Глава шестая</i> Изотопы . . . . .	214
<i>Глава седьмая</i> Штурм атомного ядра. . .	264
<i>Глава восьмая</i> Космические лучи и позитроны . . . . .	301
<i>Глава девятая</i> Искусственные вещества . .	333
<i>Глава десятая</i> Нейтрино? . . . . .	348

---



Редактор *М. Г. Чернишовский*. Технический редактор *Р. В. Эмдина*.

Корректор *А. Н. Кузьмин*.

Сдана в набор 5/VII 1935 г. Подписана к печати 16/XI 1935 г.

Формат  $82 \times 110^{1/32}$ . ОНТИ № 65. Бум. листов 5,11. Тип. ан. в 1 бум. л. 154,112.

Ленторлит № 30744. Тираж 10.000. Авт. л. 16,26. Заказ № 810.

---

2-я тип. ОНТИ им. Евг. Соколовой. Ленинград, пр. Кр. Командиров, 29.

2р 75к пер. 60к

---

НП - 6 - 4