

Ф. Содди
АТОМНОЙ

ИСТОРИЯ
ЭНЕРГИИ





Frederick Soddy, F. R. S. THE STORY OF
ATOMIC ENERGY

A NEW ATLANTIS PUBLICATION
LONDON
NOVA ATLANTIS 1949

Ф. Содди

ИСТОРИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

*Перевод с английского М. Ю. Богданова,
М. В. Колокольниковой, А. Ю. Пентина*

*Под редакцией канд. физ.-мат. наук
А. Н. Кривомазова и д-ра хим. наук
Д. Н. Трифонова*



МОСКВА
АТОМИЗДАТ 1979

Содди Ф. История атомной энергии: Пер. с англ./Под ред. А. Н. Кривомазова, Д. Н. Трифонова. — М.: Атомиздат, 1979 — 288 с. — Англия 1949.

Это последняя научно-популярная книга, написанная выдающимся английским радиохимиком, лауреатом Нобелевской премии по химии Фредериком Содди (1877—1956) и выдержавшая два издания в Англии и одно в Италии. Автор очень интересно и подробно знакомит читателей с историей познания строения и свойств материи, связи между электрическими и магнитными явлениями, взаимопревращений различных форм энергии и т. д. Центральную часть книги составляют главы о становлении современной ядерной физики. Великолепно изложена история важнейших открытий в этой области. Будучи современником многих описываемых событий, автор старается передать (и это ему удается) атмосферу «золотого периода» науки о ядре, что делает изложение очень увлекательным. Книга представляет огромный историко-научный и культурный интерес как уникальная оценка полувекowego развития ядерной физики с позиций одного из ее основателей.

Живо написанная и хорошо иллюстрированная, эта книга полезна широкому кругу читателей: школьникам старших классов и студентам вузов, преподавателям, историкам науки и всем, кто интересуется историей науки.

Рис. 92. Табл. 2. Список литературы 10 наименований.

С $\frac{20401-098}{034(01)-79}$ 98—1979 • 1602000000

© Перевод на русский язык.
Атомиздат, 1979

Фредерик Содди родился 2 сентября 1877 г. в Истборне (графство Суссекс, Англия). Он был седьмым, последним ребенком в семье небогатого хлеботорговца. Когда Фредерику исполнилось 1,5 года, умерла его мать. В поисках прочного заработка отец надолго уехал в Лондон, и заботы о детях легли на плечи старшей сестры.

Семья Содди была глубоко религиозной (дед его был в свое время миссионером-кальвинистом); неудивительно поэтому, что первыми учителями Фредерика были два священника, с помощью которых он получил начальное образование. Мальчика рано заинтересовала художественная и научно-популярная литература, нередко он вступал с дедом в споры на религиозные, нравственные и естественно-научные темы — и в этих жарких спорах дед редко мог поставить младшего внука в тупик. Фредерик остался на всю жизнь единственным в семье атеистом. Он очень рано почувствовал свою самостоятельность и отчужденность от окружающей его среды. Фредерик выработывал в себе иную точку зрения на мир, и здесь ему на помощь пришли книги Плутарха, Светония, Шекспира, Байрона, Китса, Шелли, Локка, Гексли, Рёскина. Первоначально порвав лишь с религией, Фредерик постоянно воспитывал в себе «культ героев» — сильных и духовно, и физически личностей, способных бросить вызов социальному окружению и активно противостоять ему. Эта черта характера во многом определила последующую судьбу Содди.

В четырнадцать лет Фредерика определили в Истборнский колледж для мальчиков, и с 1891 г. начался восьмилетний период его учебы в различных колледжах южной Англии: 1891—1894 гг. в Истборнском колледже для мальчиков; 1894—1895 гг. — учеба в Уэльсском университетском колледже в Аберистунте; 1896—1898 гг. — в Мертон-колледже в Оксфорде; 1898—1900 гг. — стажировка в химической лаборатории Балиль-колледжа в Оксфорде.

Учился Содди блестяще, за время учебы выполнил ряд научных исследований (в 16 лет опубликовал первую статью по химии в научном журнале «Chemical News», издаваемом В. Круксом); участвовал в различных университетских конкурсах; сочинял стихи, делал доклады, писал статьи для университетского студенчес-

кого журнала. В короткое время он завоевал себе репутацию трудолюбивого и чрезвычайно увлеченного учебной студента. За годы учебы перед Фредериком прошло много замечательных педагогов, некоторые из них были крупными учеными в своей области. Знакомство и дружба с преподавателями привили ему любовь к науке и уважение к труду педагога, упрочили в нем чувство самостоятельности и веры в себя.

В последние годы учебы в Оксфорде Фредерик начинает упорно готовить себя к преподаванию химии: изучает историю химии; тщательно штудирует неорганическую и органическую химию; занимается репетиторством и, чтобы стать хорошим лектором, увлеченно изучает искусство риторики. Он с отличием заканчивает учебу в Оксфорде (на выпускном экзамене его знания привели в восторг В. Рамзая и В. Одлинга) и получает в 1898 г. степень бакалавра искусств Оксфордского университета. В конце 1899 г. Содди узнал, что освободилась кафедра химии в университете в Торонто. Он собрал рекомендации и отправился в Канаду.

В Канаде Содди пробыл немногим более трех лет. Он не получил кафедры химии ни в Торонто, ни в Монреале; его самонадеянности несколько поубавилось, и он согласился на должность демонстратора химии в университете Мак-Гилла в Монреале. В университете он познакомился с 29-летним профессором физики Эрнестом Резерфордом, который предложил ему совместно изучать химические свойства нового радиоактивного вещества — эманации тория. Их чрезвычайно успешное сотрудничество продолжалось около двух лет; в итоге было опубликовано девять фундаментальных совместных статей. Они открыли новый радиоэлемент торий-Х (радий-224), доказали химическую инертность двух радиоактивных газов — эманации тория (радон-220) и эманации радия (радон-222), а также разработали основы теории радиоактивного распада, которая сыграла решающую роль в развитии учения о радиоактивности.

В 1903 г. Содди вернулся в Англию, где в лаборатории Рамзая при университетском колледже в Лондоне продолжал изучение радиоактивности. Первое его блестящее достижение в этот период — спектроскопическое доказательство образования гелия при распаде эманации радия и самого радия — послужило новым важным обоснованием правильности теории радиоактивного распада.

В конце 1903 — начале 1904 г. Содди прочел много лекций о проблемах радиоактивности для широкой аудитории; в 1904 г. он издал их в виде книги «Радиоактивность — элементарное изложение с точки зрения распада атомов», встретившей восторженный прием в Англии и переведенной в Германии и России. В качестве обозревателя работ по радиоактивности он сотрудничает в центральных реферативных журналах Англии — «Nature» и «Chemical Abstracts», но все это время он не оставляет мысли занять вакантную кафедру химии.

В 1904 г. Содди принял предложение университета в Глазго прочитать студентам курс лекций по радиоактивности и физической химии. Период работы в университете в Глазго (1904—1914) оказался самым плодотворным во всей научной деятельности ученого. Важнейшими научными результатами этого периода были: 1) в области эксперимента — доказательство химической неотделимости радия и мезотория-1; химической неотделимости урана- X_1 и урана- Y ; связи актиниевого семейства с семейством урана; изотопии свинца (на примере свинца ториевого происхождения); 2) в области теории — обобщение множества разрозненных данных о химических свойствах радиоактивных элементов; написание ежегодных обзоров развития учения о радиоактивности; формулировка альфа-правила Содди (при альфа-распаде происходит смещение элемента на два места в периодической системе); формулировка закона радиоактивных смещений и введение в науку концепции изотопии. Кроме того, за это время он воспитал ряд талантливых учеников — А. Флека, А. С. Рассела, Дж. А. Крэнстона и др.

В Глазго Содди по-прежнему часто читает лекции об успехах в изучении радиоактивных веществ для самой широкой аудитории. Там же он написал несколько замечательных научно-популярных книг о радиоактивности: «Интерпретация радия» (1909), «Химия радиоэлементов» (часть первая — 1911, часть вторая — 1914), «Материя и энергия» (1912). Все эти книги были многократно переизданы в самой Англии, а также переведены и выдержали несколько переизданий в Германии, России и Франции.

Важнейшим событием в личной жизни Содди в это время явилась его женитьба в 1908 г. на дочери видного шотландского организатора науки и техники Джорджа Бейлби — Винифред Мёллер Бейлби, ставшей верной спутницей Содди в жизни, научной работе и во всех его развлечениях, главным образом в туристских и альпинистских походах. Супруги прожили вместе 28 лет, детей у них не было. (Смерть жены в 1936 г. явилась страшным ударом для Содди и послужила причиной его ухода в отставку).

В 1910 г. Содди был избран членом Лондонского Королевского общества, а через три года, по инициативе В. Рамзая, ему была присуждена премия имени Станислао Канниццаро.

В эти годы в России появляются первые переводы книг Содди, встретившие благожелательный прием у читателей. Интересно отметить, что ни в какой другой стране мира книги Содди, всегда первоначально публиковавшиеся на его родине, в Англии, не переводились и не переиздавались так часто, как в России. Уже в 1903 г. в виде отдельной книги «Радиоактивные явления» вышел перевод популярных лекций Содди по радиоактивности, едва лишь они были опубликованы полностью в английском журнале «Electrician», а в следующем году, когда Содди издал свою первую книгу, она была сразу же переведена на русский язык. Но подлинная популярность среди русских читателей пришла к Содди в 1910 г.:

в России под названием «Радий и его разгадка» появились многочисленные переводы блестяще написанной научно-популярной книги Содди «Интерпретация радия». Эта книга выдержала в России шесть (1) изданий: среди ее переводчиков и редакторов мы встречаем имена Н. А. Шилова, Д. Д. Хмырова, Е. Д. Толмачевой, В. Г. Хлопина. Характеризуя эту книгу, ее первый переводчик Н. А. Шилов писал: «Книга Содди развешивает перед неспециалистами-читателями действительно глубоко захватывающую и увлекательную картину неведомых до сих пор тайн природы и рисует в ярких словах — иногда в широких образах — то, что в этой области уже завоевано и что предстоит завоевать будущим поколениям. Под пером автора вопрос из чисто научной задачи разрастается до глубоко философской проблемы и переходит в красивый полет научной мысли... Много было говорено по поводу радия, но вряд ли кто-нибудь сумел сказать свое слово с такой верой в науку, с таким убеждением в широкий интерес излагаемого предмета, и сказать притом так красиво и увлекательно». Максим Горький, прочитав эту книгу Содди, высоко оценил ее достоинства и горячо рекомендовал ее прочесть многим литераторам и своим корреспондентам. Так, в октябре 1911 г. он писал А. В. Амфитеатрову: «Хотите испытать большое наслаждение? Прочитайте книжку Содди „Радий“». А вот строки из его письма той же поре Н. Е. Буренину: «И прочитай книжку Содди „Радий“, издание „Матезис“ — удивительная вещь и это необходимо знать»; в начале 1912 г. Горький пишет О. П. Руновой: «А все-таки мир шествует вперед! Мне очень хотелось бы, чтобы Вы посмотрели последние страницы книжки Содди „Радий“ — посмотрите, это очень воодушевляет!»

Переводчиками и редакторами других книг Содди в России явились Р. Я. Шмидт и В. А. Бородовский («Химия радиоэлементов», русский перевод 1913 г.); С. А. Займовский и Н. А. Морозов («Материя и энергия», русский перевод 1913 г.), а также К. А. Лентьева и А. К. Тимирязев (та же книга, другое издание, 1913 г.). С большим вниманием и уважением следил за научными и научно-популярными работами Содди выдающийся русский естествоиспытатель В. И. Вернадский, в работах которого можно найти много ссылок на статьи и книги Содди, а также высокую оценку личности и научного вклада английского радиохимика.

В 1914 г. сбылась престижная мечта Содди — он стал профессором кафедры Абердинского университета. Он переехал из Глазго в Абердин с большим желанием продолжить свою работу по изучению изотопии радиоактивных элементов, но был поставлен перед необходимостью в условиях трудного военного времени заново обзаводиться лабораторией и чрезвычайно дорогостоящими радиоактивными препаратами. И все-таки, несмотря на эти трудности, он смог в Абердине выполнить ценное экспериментальное исследование по изучению изотопии свинца ториевого происхождения, а также опубликовать ряд интересных теоретических работ. Первая

мировая война побудила Содди приступить к изучению проблем социальной и экономической жизни современного общества. Поводом к такому переходу послужила трагическая смерть в сражении под Галлиполи выдающегося физика Генри Мозли.

«Когда Мозли убили при Галлиполи, — говорил Содди своему биографу М. Хауртс, — меня охватило бешенство. Иногда я чувствовал, что что-то ломается в моем мозгу, — что-то, что разрывало настоящее и прошлое. Я почувствовал, что правительства и политики — или даже человек вообще — еще не способны использовать науку, которую они, очевидно, не понимают. Мой разум переключился с научных исследований в область поисков причин неудачи науки осчастливить человечество, подарив ему мир и изобилие. Я погрузился в экономику. Я изучал и разрабатывал денежные реформы. Наука должна быть использована для конструктивных целей. Целью являлось богатство нации, — и я отправился освещать пути».

В 1916 г. Содди был избран президентом научной ассоциации Абердинского университета. На собрании ассоциации 3 ноября 1916 г. он обратился к собравшимся с посланием, которое назвал «Будущее науки и что загораживает пути». Главным тормозом развития науки Содди назвал войны.

Период работы Содди в Абердине был насыщен социальными и экономическими исследованиями; ученый читал лекции в различных студенческих обществах и рабочих клубах (во время этих лекций аудитории были всегда переполнены); его уважали и ценили коллеги; многочисленные знаки внимания оказывали ему и студенты. Но сам Содди испытывал беспокойство от этого постоянного успеха, временами ему хотелось испытать чувство сопротивления своим идеям и начинаниям. Понимал он и другое: все его социальные призывы, пусть даже встречаемые восторженными аплодисментами, в провинциальном Абердине осуждены на забвение. Он собирался занять кафедру химии в университете в Бирмингеме, но неожиданно в июне 1919 г. получил приглашение возглавить только что организованную кафедру неорганической и физической химии в Оксфордском университете.

В Оксфорде Содди было суждено испытать много разочарований. Однако в первые годы после его переезда ничто, казалось, не предвещало их. В 1919 г. он был избран в Шведскую Академию наук; в 1921 г. по рекомендации Э. Резерфорда и Дж. Дж. Томсона ему была присуждена Нобелевская премия по химии (вручение премии состоялось в декабре 1922 г.; премии по физике были вручены А. Эйнштейну и Н. Бору, а по химии — Ф. Содди и Ф. Астону); в 1924 г. Содди был избран почетным иностранным членом-корреспондентом Академии наук СССР. В 1928 г. университет в Глазго присудил ему диплом почетного доктора естествознания, а в 1928 г. Итальянская Академия наук избрала его своим иностранным членом.

Столкнувшись с необходимостью заново обзаводиться лабораторией, Содди предпринял энергичные меры по реконструкции старых и неудобных помещений Оксфордского университета, в которых читались лекции по химии и проводились лабораторные работы. Он сам чертил все необходимые чертежи, сам вел переговоры с рабочими, руководил реконструкцией. Для получения необходимых средств ему пришлось много спорить с администрацией университета — новаторство в Оксфорде не поощрялось, там ценились традиции. Содди все чаще обнаруживал свою изоляцию в обществе оксфордских профессоров. Не смог он также завязать тесные, как в Абердине, контакты со студентами.

Научные исследования в Оксфорде Содди вел в нескольких направлениях: исследование способов химической обработки радиоактивных минералов для выделения радиоэлементов; изучение актинового радиоактивного ряда; завершение работы по изучению происхождения радия. Наряду с научной работой он выполнил также большой объем изобретательской работы, сконструировав ряд оригинальных механизмов, которые были запатентованы, но не получили практического применения. Интересно, что Содди явился одним из предшественников Ванкеля, разработав модель двигателя внутреннего сгорания без коленчатого вала.

В двадцатые годы Содди опять возвращается к проблемам экономики. Он издает свои социально-экономические работы в виде отдельной книги «Наука и жизнь», которая встретила теплый прием у читателей. Так, Резерфорд писал Содди: «Вашу новую книгу «Наука и жизнь» я прочел с огромным интересом и удивлением, она содержит ряд очерков, которые я не видел раньше, и я полагаю, что Вы провели хорошую пропаганду среди широких масс путем лекций о влиянии науки на жизнь людей».

Содди читает лекции для рабочих, печатает статьи «Рабочий класс и наука в промышленности», «Наука и экономика», совершает поездки по различным университетам Англии и всюду читает лекции по экономике, указывает на начинающуюся дегуманизацию науки, на ее «извращение» и деградацию, на утрату ею своего независимого положения и все большее подчинение ее интересам класса капиталистов. Прочитанный им в течение 1923 г. в различных университетских центрах курс лекций был опубликован в виде книги «Извращение науки и схема научных преобразований», а его экономические воззрения были подытожены в книге «Богатство, подлинное богатство и долг: решение экономического парадокса» (1926) и затем сжато изложены в книге «Деньги против человека: утверждение мировой проблемы с точки зрения новой экономики» (1931).

Экономические идеи Содди, представлявшие сложный конгломерат воззрений ряда известных Содди экономистов, не встречали горячей поддержки в Оксфорде, а тезис Содди о справедливом распределении результатов труда между всеми членами общества

обрушил на него град насмешек и газетных пасквилей. Изоляция Содди в Оксфорде постепенно росла, поэтому, вероятно, он был удивлен и обрадован, когда группа известнейших английских ученых — Д. Халл, Дж. Г. Краузер, Дж. Д. Бернал, В. Х. Мортрам, Э. Чарльз, П. А. Гоурер, П. М. Блеккет — обратилась к нему в 1934 г. с просьбой написать предисловие к их сборнику «Крушение науки», где обсуждались проблемы использования правительствами результатов науки в противообщественных целях. В своем предисловии Содди вновь напомнил о социальной ответственности ученых и университетов, призванных говорить правду и только правду широким слоям общества: «Нужно потребовать, чтобы наши университеты и научные общества не уклонялись больше от своей ответственности и не прятались за ширмой фальшивых разглагольствований о том, что они-де являются наемными слугами мира, но делали то, ради чего общество освободило их от рутинной деятельности, и говорили народам истину, хотя бы это и грозило низвержением небес». По-видимому, в этом предисловии отчасти отразились «оксфордские» настроения Содди.

После смерти жены в 1936 г. Содди удалился в Брайтон, на юг Англии. Он живет одинокой жизнью, редко встречается с людьми (единственным исключением являются его ученики, которым он всегда был готов прийти на помощь и средствами, и советом). Свой досуг он посвящает изучению математических проблем, продолжает эпизодически читать лекции в различных клубах и писать статьи по экономике.

Вторая мировая война принесла Содди моральные муки, которые еще больше усилились, когда в августе 1945 г. были сброшены атомные бомбы на Хиросиму и Нагасаки. Содди одним из первых предсказал неизбежность использования человеком энергии радиоактивного распада и первым предостерег от опасности использования атомной энергии в военных целях (1909 г.). Ему не верили ни М. Кюри, ни Э. Резерфорд. Когда же атомные бомбы были сброшены, из пионеров учения о радиоактивности в живых оставался только он один. Содди в короткий срок написал свою лучшую послевоенную книгу «История атомной энергии» (выдержавшую два издания в Англии и одно в Италии), в заключительной главе которой высказал немало горьких упреков и в адрес политиков, и в адрес ученых. Мир без войн, окончательное уничтожение войн, использование атомной энергии исключительно в интересах благосостояния всего общества — вот центральные темы этой главы.

В 1953 г. Содди познакомился с журналисткой М. Хауортс. Она написала две книги об этом выдающемся английском радиохимике, умершем три года спустя, 22 сентября 1956 г., в возрасте 79 лет в Брайтоне, в 30 км от городка, в котором он родился.

Деятельность Фредерика Содди в области учения о радиоактивности продолжалась сравнительно недолго: с 1901 по 1917 г. —

от первых его работ совместно с Э. Резерфордом до открытия протактиния. На протяжении последующих 40 лет своей жизни Содди проводил лишь эпизодические исследования да иногда выступал с публикациями, носившими обзорный либо мемориальный характер. Чем объясняется этот удивительный для большого ученого спад творческой активности в избранной им области науки? К ответу на поставленный вопрос нам еще предстоит вернуться.

Но и 16 лет — срок достаточно большой, чтобы даже ученый более низкого ранга мог достигнуть заметных успехов, пусть эти достижения и не войдут в золотой фонд науки. То же, что сделал Содди, те открытия, в которых его участие сыграло важнейшую роль, без всякого преувеличения требуют эпитета «величайшие». Эти открытия не только составили фундамент учения о радиоактивности, но и прямо повлияли на развитие глобальных представлений о строении и свойствах вещества. Речь идет, во-первых, о создании теории радиоактивного распада, во-вторых, об экспериментальном доказательстве образования гелия из эманации радия, в-третьих, о формулировке закона радиоактивных смещений и введении концепции изотопии. Упомянутые открытия заслуживают здесь более развернутой характеристики, что позволит правильнее и глубже понять истинный вклад Содди в учение о радиоактивности.

Летосчисление этого учения ведет начало с 1 марта 1896 г., когда французский физик Анри Беккерель (до тех пор признанный специалист в области исследования люминесценции) обнаружил неизвестное ранее сильно проникающее излучение, испускаемое солями урана. Данное событие на первых порах отнюдь не потрясло воображение современников. В физике господствовал своеобразный «лучевой бум», пиком которого стало открытие в 1895 г. немецким ученым Конрадом В. Рентгеном знаменитых X-лучей. Их «сияние» затмевало сделанное Беккерелем наблюдение, да и сам французский ученый первоначально считал, что имеет дело с рентгеновским излучением, сопровождающим явление фосфоресценции. Подобное заблуждение было, к счастью, кратковременным. Уже на исходе 1896 г. Беккерель понял, что ответственным за новое излучение является элемент уран, и «урановые» лучи по многим своим параметрам отличаются от рентгеновских, хотя бы потому, что имеют, так сказать, первичное происхождение. Их источник коренился где-то в самом уране — в атомах урана, они испускались постоянно и с неослабевающей интенсивностью. В то же время X-лучи были вторичными, возникали после предварительного возбуждения их источника. Как ни парадоксально, но истинная природа лучей Рентгена получила объяснение после того, как возникла теория радиоактивного распада.

Открытие Беккереля устами Марии Кюри было окрещено явлением радиоактивности. Та же Мария Кюри внесла величайший

вклад в развенчание исключительности урана как единственного источника радиоактивных излучений. Аналогичное свойство было замечено у тория (независимо это установил немецкий физик Г. Шмидт). Еще более важным оказалось то, что в природе удалось обнаружить два новых радиоактивных вещества, испускающих лучи несравненно сильнее, чем уран. Мария и Пьер Кюри посчитали их за новые химические элементы и назвали полонием и радием, предположив, что они должны занимать места в конце периодической системы, там, где ее создатель, Д. И. Менделеев, прозорливо оставил несколько пустых клеток. И тем самым в учении о радиоактивности пересеклись впервые физическая и химическая «нити», заложились первоосновы радиохимии — дисциплины, где Содди предстояло сыграть выдающуюся роль.

Рядом с именами Беккереля и супругов Кюри появилось имя еще одного пионера изучения радиоактивности — Эрнеста Резерфорда, с которым спустя несколько лет судьба сведет Фредерика Содди. Резерфорд твердо установил неоднородность радиоактивного излучения, показав, что оно состоит из α - и β -компонент, и материальную природу α -излучения.

На стыке столетий выяснилось, что радиоактивных веществ больше, чем казалось вначале. К урану, торию, полонию и радю добавились новые активности: актиний, три эманации (загадочные газообразные выделения радия, тория и актиния), наконец, не менее загадочный уран-Х, который, будучи отделен от урана, словно забирал у последнего всю активность. Один за другим вставали вопросы. Была неясна сама природа радиоактивности, т. е. за счет чего поддерживается процесс излучения. Внешние ли причины обуславливают его, или они скрыты внутри атомов? Что происходит с атомами радиоактивных веществ, когда они в результате излучения теряют α - или β -частицу? Что представляют собой эфемерные эманации? Наконец, чем являются, в конце концов, сами радиоактивные вещества: химическими элементами в каноническом понимании или же они что-то совершенно иное, необычные материальные образования? И если это элементы, то где их места в менделеевской периодической системе? А число радиоактивных веществ уже превышало число вакантных мест в таблице элементов... Парадоксально, но факт: учение о радиоактивности в самом начале своего развития вступало в пору кризиса.

Э. Резерфорд к моменту знакомства с Содди (осень 1900 г.) был профессором физики Мак-Гиллского университета в Монреале (Канада). Физику, уже зарекомендовавшему себя в деле изучения радиоактивности, настоятельно требовался специалист-химик для изучения химических свойств открытой Резерфордом эманации тория. Выбор пал на Содди не случайно: Резерфорд интуитивно почувствовал в нем незаурядную личность. И действительно, Содди удалось со всей убедительностью продемонстрировать, что эманация тория — это газ, выделяющийся из растворов солей тория,

притом газ, не вступающий ни в какие химические реакции, подобно инертным газам из семейства аргона. В ходе исследования эманации тория было обнаружено новое радиоактивное вещество — торий-Х (названное так по аналогии с ураном-Х, незадолго до этого открытым В. Круксом).

Изучение тория-Х заложило предпосылки для разработки основ теории радиоактивного распада, поскольку Резерфорд и Содди констатировали факт равновесной природы радиоактивности: активность излучающего вещества в каждый момент времени отражает, с одной стороны, факт образования (с некоторой постоянной скоростью) дочернего продукта и, с другой — одновременного спада (также с постоянной скоростью) активности этого продукта. В этой идее содержится зародыш представлений о генетической связи радиоэлементов.

Один из примеров такой связи: торий — торий-Х — эманация тория. Важным было то, что все три звена цепи имеют различную химическую природу.

От открытия факта равновесной природы радиоактивности тория до формулировки основ теории радиоактивного распада был один шаг — Резерфорд и Содди сделали его.

В своих девяти совместных статьях Резерфорд и Содди обсудили различные продукты радиоактивного распада и их физико-химические свойства. Они показали, что радиоактивность известных им исходных элементов — радия, тория, урана — обусловлена непрерывным образованием новых видов материи, обладающих менее продолжительной активностью. В качестве одного из возможных конечных продуктов распада радиоактивных атомов ученые назвали гелий, который всегда присутствует в радиоактивных минералах. Все известные радиоэлементы были объединены учеными в три генетические цепочки — прообразы будущих радиоактивных рядов урана-радия и тория. Теперь каждую радиоактивную индивидуальность (каждый радиоэлемент), согласно Резерфорду и Содди, можно было характеризовать не только периодом полураспада и соответствующими физическими и химическими свойствами, но и положением на определенном месте в определенном радиоактивном ряду. Вслед за М. Кюри ученые считали общей химической характеристикой радиоактивных элементов их высокую атомную массу. В основе природы радиоактивности Резерфорд и Содди увидели распад атома: «Поскольку радиоактивность есть специфическое свойство элемента, то превращающейся системой должен быть химический атом, а поскольку в образовании новой системы и одновременно, кроме нее, нескольких тяжелых заряженных частиц участвует только одна система, то химический атом при радиоактивном превращении должен претерпевать распад».

Содди покинул Канаду 19 февраля 1903 г. Он направился в Лондон к Вильяму Рамзаю для дальнейшего изучения в его лаборатории химических свойств радиоактивных веществ,

В совместном исследовании Рамзаем и Содди был получен фундаментальный результат, подтверждающий правильность теории радиоактивного распада, — спектральным методом ученые доказали непрерывное образование гелия при распаде эманации радия. Один элемент образуется из другого — газ порождает газ; этот сенсационный опыт был повторен во многих лабораториях мира, и всюду результат Рамзая и Содди был подтвержден. В 1908 г. Э. Резерфорд и Р. Ройдс доказали, что гелий образуется при распаде радиоактивных веществ благодаря деионизации α -частиц, которые, по современным представлениям, являются ядрами гелия.

К своему третьему выдающемуся открытию — открытию изотопии радиоактивных элементов и формулировке закона радиоактивных смещений — Содди пришел в результате длительного изучения химических свойств радиоэлементов. Из года в год рецензируя для «Chemical Abstracts» множество оригинальных работ по радиоактивности, Содди заинтересовался случаями удивительного сходства химических свойств у радиоэлементов, принадлежащих к одному и тому же или разным радиоактивным рядам. В 1909 г. шведские химики Д. Стрёмгольм и Т. Сведберг первыми провели систематическое исследование большого числа радиоактивных элементов и сделали вывод, что на каждое место в периодической системе нужно помещать несколько радиоэлементов, отметив, что это явление может встречаться не только в области элементов с высокими атомными массами, но и в любом месте периодической системы. В 1910 г., комментируя работу Стрёмгольма и Сведберга, Содди указал, что в случае химически неотделимых радиоэлементов наблюдаются «не простые химические аналогии, но химические тождества», а поскольку все радиоэлементы незначительно различаются по своим вычисленным атомным массам, то «химическая однородность не является более гарантией того, что всякий рассматриваемый элемент не есть смесь нескольких с различными атомными массами или что атомная масса не есть просто среднее число». В 1911 г. была опубликована важная статья Содди «Химия мезотория», в которой он, вслед за Волтвудом и Марквальдом, констатировал экспериментальную невозможность химического разделения радия и мезотория-1; Содди сделал далеко идущий вывод: «Кажется, химия должна рассмотреть случаи, противоречащие периодическому закону, а именно — полную химическую идентичность элементов с различными предполагаемыми атомными массами; несомненно, какой-то глубокий общий закон лежит в основе этих новых отношений... Естественно, возникает вопрос, а не могут ли некоторые обычные элементы в действительности являться смесями химически неотделимых радиоэлементов в постоянных пропорциях... Это объяснило бы отсутствие регулярных отношений между числовыми значениями атомных масс».

Следующим важным шагом к решению проблемы размещения

радиоэлементов в периодической системе явилась книга Содди «Химия радиоэлементов», впервые опубликованная в 1911 г. Эта книга явилась чрезвычайно актуальным для того времени систематизированным справочником, в котором были сведены воедино данные о химических свойствах радиоэлементов, способах выделения радиоэлементов в чистом виде, химические аналогии между радиоэлементами и стабильными элементами периодической системы. Все это обусловило широкое распространение книги среди радиохимиков и ее быстрый перевод на немецкий, французский и русский языки.

Не предлагая конкретного варианта размещения радиоэлементов в периодической системе, Содди тем не менее старался указать для каждого радиоэлемента его гомолог в периодической системе и полнее представить имевшиеся данные о его химических и радиоактивных свойствах, положении в данном радиоактивном ряду и аналогиях с радиоэлементами из других радиоактивных рядов.

Рассматривая радиоактивные ряды на фоне периодической системы, Содди смог подметить два новых важных положения: в результате α -распада валентность радиоэлементов всегда изменяется на две единицы (дословно: «потеря атома гелия или α -частицы, по-видимому, обуславливает превращение элемента не в элемент ближайшей соседней группы, а в элемент группы, рядом с ней находящейся»); ход радиоактивных рядов на фоне периодической системы не прямолинеен, а имеет несколько «зигзагов» (благодаря которым ряды становятся как бы короче).

Существенным тормозом на пути решения проблемы размещения радиоэлементов в периодической системе явилось отсутствие данных о химических свойствах короткоживущих радиоэлементов в постэманационной части радиоактивных рядов (преимущественно β -излучателей в так называемой области «активных осадков»). Для ликвидации этого белого пятна Содди поручил своему ассистенту А. Флеку провести систематическое изучение случаев химической неотделимости на фоне всех радиоэлементов, но прежде всего — короткоживущих β -излучателей.

Исследование Флека растянулось на несколько лет. Содди его не торопил. В результате первыми с публикациями по данной проблеме выступили другие ученые. 15 декабря 1912 г. редакция «*Physikalische Zeitschrift*» приняла октябрьскую статью Г. Хевеши (опубликована 15 января); а 31 декабря 1912 г. в этот же журнал поступила большая, из двух частей, статья К. Фаянса (опубликована 15 февраля). Во второй половине января 1913 г. в «*Chemical News*» поступила статья А. С. Рассела, вчерне написанная им в августе 1912 г. (опубликована 31 января 1913 г.). И только спустя месяц, 28 февраля 1913 г., в «*Chemical News*» была напечатана статья Содди о проблеме размещения радиоэлементов в периодической системе. В этих работах все авторы допустили ошибки, но им удалось сформулировать правила радиоактивных смещений.

Содди, единственный из этих ученых, продолжил теоретическое изучение проблемы размещения радиоэлементов в периодической системе, используя представление о ядерной модели атома Резерфорда. Неудивительно поэтому, что 4 декабря 1913 г. была опубликована главная статья Содди по этой проблеме — ученый вводит в науку представление об изотопах и формулировал в четкой форме закон радиоактивных смещений.

С 1914 по 1916 г. Содди выполнил несколько экспериментальных исследований, посвященных измерению атомной массы свинца ториевого происхождения, причем ему первому удалось показать, что изотоп свинца ториевого происхождения имеет наибольшее массовое число (208) среди других стабильных изотопов свинца.

В декабре 1917 г. Содди и его ученик А. Крэнстон направили в редакцию журнала «*Proceedings of the Royal Society*» большую статью, в которой излагались результаты проведенных ими экспериментов по поиску нового радиоэлемента, являющегося материнским веществом для уже известного β -излучателя актиния-227. Ученые не смогли получить надежные количественные характеристики нового радиоэлемента, но им удалось дать качественное подтверждение того, что новый радиоэлемент должен быть изотопом урана- X_2 . Независимо от Содди и Крэнстона подобное исследование провели немецкие радиохимики О. Ган и Л. Мейтнер, которые получили надежную количественную информацию о свойствах этого радиоэлемента, названного ими протактинием.

За открытие явления изотопии среди радиоактивных элементов Ф. Содди был удостоен в 1921 г. Нобелевской премии по химии. Однако в год вручения премии ученый уже не находился в авангарде исследователей радиоактивности: в результате отсутствия подходящей лаборатории и увлечения экономическими проблемами активной научную деятельность в области изучения радиоактивности Содди фактически прекратил.

Среди книг, написанных Содди после второй мировой войны, бесспорно самой интересной и значительной является «История атомной энергии» (1949). К написанию этой книги ученый готовился исподволь всю свою сознательную жизнь, в основу ее положены конспекты факультативного курса лекций Содди по истории химии, которые он читал в Канаде в 1900—1901 гг., а также его более поздние научно-популярные книги и лекции: «Радий и его разгадка» (1908); «Материя и энергия» (1912); «Наука и жизнь» (1920); «Происхождение концепции изотопов» (12 декабря 1922 г.); «Интерпретация радия (Радиоактивные элементы и изотопы. Общий прогресс атомной химии)» (1932), «Ядерная эра: роковая неделя на 45-м году атомного века» (18 августа 1945 г.); «Точка зрения независимого ученого на экономические и политические возможности атомной энергии для будущего» (30 октября 1947 г.).

Книга «История атомной энергии» Содди состоит из 13 глав.

В первых четырех главах вкратце говорится об основных идеях физики и химии (преимущественно атомистические представления и взгляды на природу энергии и электричества) от глубокой древности до периода «революции в естествознании» (1895—1897), ознаменовавшегося открытием рентгеновского излучения, радиоактивности и электрона. Две следующие главы — «Открытие атомной энергии» и «Энергия и масса: изотопы» — посвящены становлению учения о радиоактивности, в разработке которого Содди принял самое непосредственное участие. Седьмая — двенадцатая главы дают представление о важнейших достижениях в феноменально быстром развитии ядерной физики, увенчавшемся триумфальным синтезом новых трансурановых элементов и трагическими взрывами атомных бомб. Заключительная, тринадцатая глава подводит основные итоги и ставит перед читателем вопрос о социальной ответственности ученого, о возникшей дилемме двух противоположных путей развития атомной энергии в руках человечества — мирном и военном.

Про книгу Ф. Содди можно с полным основанием сказать, что в ней словам тесно, а мыслям просторно, — она является чрезвычайно емкой по своему содержанию, представляя квинтэссенцию раздумий семидесятилетнего ученого о путях и судьбах развития атомной теории, начиная с древнейших времен. В то же время мы видим в книге своеобразный творческий отчет о фундаментальной научной работе, проделанной учеными разных стран в первой половине XX столетия, работе, приведшей к практическому овладению ядерной энергией.

Особенно ценно то, что книга написана исследователем, который в истории атомной энергии занимает одно из ведущих мест. Книга Содди стала одной из первых публикаций, в которой проблема практического выделения ядерной энергии получила достаточно подробное освещение, доступное пониманию широкого круга читателей. Уже одно это делает ее небезынтересной и для читателей сегодняшнего дня. Но ее особую актуальность можно видеть в отношении Содди к возможным путям практического использования ядерной энергии. В заключительной, тринадцатой главе Содди со всей резкостью осуждает военное применение атомной энергии и четко показывает, к каким ужасающим последствиям могло бы привести такое применение. В этой же главе Содди поднимает вопрос об ответственности ученых перед обществом, говорит о необходимости широкого международного сотрудничества ученых, — такого сотрудничества, которое было бы направлено против использования новейших научных достижений в военных целях. Нельзя не отдать должного смелости ученого, — ведь обо всем этом он во всеуслышание заявлял в самый разгар «холодной войны». Поэтому взгляды Содди являются своеобразным завещанием будущим поколениям ученых.

В то же время Содди обсуждает возможные применения атомной энергии в мирных целях, и мы становимся свидетелями того, насколько верными оказались многие его мысли и соображения.

Вместе с тем книга несет на себе отблеск неповторимой личности ее автора. Освещая события давно минувших дней, Содди отнюдь не бесстрастен. Рассказывает ли ученый об уровне знаний в Древнем Египте или Древней Греции, пишет ли о приоритетном конфликте между Дальтоном и Хиггинсом в начале XIX столетия, повествует ли с улыбкой о нобелевской лекции Нильса Бора или обсуждает трудности в развитии ядерной физики и ее практических приложений, — везде читатель чувствует живую интонацию автора, выражающую сомнение, одобрение, иронию, а порой едкий сарказм и негодование. Но всегда при этом Содди стремится сохранять объективность. Субъективное лишь в некоторых случаях выходит на первый план. Примером может служить анализ приоритетного конфликта, возникшего между Дальтоном и Хиггинсом, чему Содди уделяет довольно большое место в соответствующей главе книги. История науки давно закрепила за Дальтоном первенствующую роль в заложении основ атомистики. Дело в том, что Содди усмотрел некоторую параллель между Хиггинсом и собой. В молодости Содди часто умаял свои заслуги* в достижении важных экспериментальных и теоретических результатов на ниве развивающегося учения о радиоактивности. И лишь спустя десятилетия, когда ученый мир привыкал к тому, что имя Содди никак не связано с теми или иными открытиями, ученый напоминал о своем действительном вкладе в эти открытия, причем не всегда в удачной форме...

Не всегда Содди объективен в освещении некоторых событий в истории науки. Например, он отдает приоритет в открытии закона периодичности английского ученому Ньюлендсу, умаяя тем самым роль Д. И. Менделеева (впрочем, такого рода противопоставления часто встречаются в английской научной и историко-научной литературе). Станным выглядит и несколько скептическое отношение Содди к теории относительности Эйнштейна. Довольно наивными выглядят многие взгляды ученого в отношении конкретных принципов осуществления контроля над использованием атомной энергии, хотя эта наивность ни в коей мере не умаляет его идей относительно самой необходимости такого контроля.

Со времени последнего (второго) издания книги Содди, с которого и сделан перевод, прошло четверть века. За это время достигнуты колоссальные успехи в развитии теоретической и экспе-

* Например, в своем большом докладе о радиоактивности, прочитанном в августе 1906 г. на заседании Британской ассоциации содействия наукам в Йорке, Содди не упомянул о своем активном участии в работах с Резерфордом и Рамзаем, называя авторами открытий лишь своих именитых коллег. — *Прим. ред.*

риментальной ядерной физики, учения о радиоактивности. На гораздо более высокий уровень вышла проблема использования атомной энергии. Неизмеримо выросла доля применения ее в общем энергетическом балансе человечества, но и гораздо более грозным стало ядерное оружие, — вот почему предостережения, содержащиеся в книге Содди, и страстный призыв ученого к обузданию сил разрушения выглядят и теперь столь актуальными.

Современный читатель обнаружит в книге немало устаревших идей и представлений. Многие изменились, многое открыто вновь. Однако было бы нецелесообразно устранять эти неизбежные недостатки путем примечаний к тем или иным местам текста, лучше сохранить, так сказать, первоначальный «аромат» изложения (примечания сделаны лишь в единичных случаях). Читатель сам разберется в том, в чем Содди был неправ, точнее, в том, чего Содди не мог знать: эти открытия еще предстояло сделать ученым.

В ряде мест книги видна политическая наивность автора; читатель это несомненно заметит и сумеет сделать соответствующие выводы.

Написанная эмоционально, ярко и вдохновенно, книга Содди оказалась, однако, весьма нелегкой для перевода. Материал изложен, если так можно выразиться, языком скорее лекционным, нежели употребляемым при научной популяризации. В книге много нестандартных оборотов, иные фразы построены несколько витиевато, и такое построение, вполне понятное английскому читателю, вызывало в ряде случаев большие затруднения в ходе перевода на русский язык.

Перевод осуществлен по второму, неизмененному английскому изданию книги. Во всех случаях переводчики и редакторы стремились к достижению ясности и простоты изложения (в отдельных местах текст оригинала оказался далек от идеала научно-популярного издания). В основном перевод книги выполнен М. Ю. Богдановым, Н. А. Богдановой (гл. 1, 3, 4, 5, 9 и 10), М. В. Колокольниковой (гл. 6 и 13), А. Ю. Пентиным (гл. 2, 8, 11 и 12). В ряде мест, написанных особенно тяжелым языком, и в случаях, допускавших неоднозначное толкование оригинала, перевод выполнен Д. С. Курочкиной (гл. 2), Б. А. Ерховым (гл. 2), А. Н. Кривомазовым (гл. 6 и 13), Е. С. Хинкис (гл. 6). В тех случаях, когда использованная Содди терминология устарела или не прижилась в науке (например, «томная физика», «негатрон», «Х-лучи» и т. д.), в тексте перевода использовались соответствующие эквиваленты, принятые в отечественной научной и научно-популярной литературе.

В конце книги приведена краткая хронология важнейших событий в развитии учения о радиоактивности, ядерной физики и мирного применения атомной энергии.

А. Н. Кривомазов, Д. Н. Трифонов

ПРЕДИСЛОВИЕ

В данной работе вниманию читателя в сжатом виде предлагается обзор открытий и идей, приведших в 1945 г. к высвобождению атомной энергии огромной силы. Вместе с тем эта книга не претендует на полную объективность и беспристрастность, поскольку ее автор является единственным из оставшихся в живых основателей теории атомного распада.

Основной теме предшествует краткий обзор достижений смежных наук вплоть до конца прошлого столетия. В самом начале этого обзора рассматривается алхимия — лженаука, которая из-за мощнейших попыток подделывать драгоценные металлы во многом способствовала упадку науки. Далее описываются взгляды древнегреческих философов на атом, предшествовавшие появлению атомистической теории в ее современном виде. К сожалению, правильная концепция ранних древнегреческих философов была почти на 2000 лет предана забвению их непосредственными преемниками. Кстати говоря, такой обзор поможет нам увидеть в истинном свете историю появления атомистической и молекулярной теорий как до, так и после зарождения в 1896 г. предмета нашей основной темы, когда Анри Беккерель открыл радиоактивность урана; к 1903 г. уже не было никаких сомнений в том, что своей радиоактивностью уран обязан процессу спонтанного распада и превращению атомов, в которых был обнаружен гигантский, ранее не подозревавшийся запас энергии.

Далее в книге последовательно рассматриваются все основные этапы развития атомной теории за прошедшие полвека. Так, в результате блистательных экспериментов удалось установить важную роль α -частиц в искусственной радиоактивности и обнаружить ядро атома, что, в свою очередь, привело к открытию изотопов, закона радиоактивных смещений, нейтрона, позитрона и дейтона. Были созданы такие сверхчувствительные и сверхточные приборы для измерения и обнаружения частиц, как камера Вильсона и масс-спектрограф, электрогенераторы напряжением в миллионы вольт и циклотрон, с помощью которого впервые удалось расщепить атом и осуществить искусственное превращение бесконечно малых частиц. Наконец, нельзя не упомянуть квантовую теорию и теорию

относительности в той мере, в какой они касаются определения структуры атома и установления факта взаимопревращений массы и энергии.

Для объяснения последних достижений современной науки в книге освещается роль нейтрона как своего рода универсального преобразователя в ядерных реакциях. Излагаются очень простые идеи, с помощью которых в наши дни можно легко понять сущность изменений, происходящих при превращении элементов. Рассматривается такой вид превращения, как деление, присущий естественным радиоактивным элементам, которые делятся нейтронами, в результате чего происходит, как и при обыкновенных химических изменениях, цепная реакция. И, наконец, дается описание наиболее чудесного из всех достижений человечества — уранового реактора и наиболее чудовищного — атомной бомбы.

В заключительной главе излагается личное мнение автора по вопросу о будущем атомной энергии.

Данная книга написана в надежде развеять широко бытующее мнение, что исследуемый автором предмет из-за своей сложности доступен только специалистам. Естественная философия всегда стремилась к тому, чтобы свести окружающий нас материальный мир к простейшим понятиям. Однако, как это ни парадоксально, на протяжении многих столетий этот поиск простоты неизменно приводил к усложнению, и лишь в наши дни он внезапно принес долгожданный результат. Любой здравомыслящий человек способен разобраться в данном предмете не хуже специалиста, если только он готов не отвергать новые идеи и принципы, а попытаться изучить их, хотя бы потому, что они способствовали открытию для человечества истины, — даже если эти идеи пока еще не вполне понятны или недостаточно последовательны. По крайней мере, читатель может быть уверен в том, что, предпринимая такую попытку, он не потратит время впустую.

Фредерик Содди

Материал этой книги впервые увидел свет в журнале «Engineering» (3 октября 1947 г. — 14 мая 1948 г.) в виде отдельных статей. Автор выражает свою признательность редакторам и издателям этого журнала за всестороннюю помощь в осуществлении публикации данной работы.

Хотелось бы также поблагодарить тех научных работников и издателей, которые предоставили в распоряжение автора имеющиеся у них иллюстрации, что дало возможность избежать ненужной затянутости и сделать эту книгу более доступной для читателя.

Ф. С.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ИЗДАНИЮ 1954 ГОДА

Мне хотелось бы сделать небольшое добавление к уже существующему предисловию, в связи с тем что недавно эта книга была утверждена в качестве учебного пособия Институтом информации по вопросам атомной энергии для неспециалистов, целью которого является распространение среди широких слоев населения правильной интерпретации атомной теории и результатов исследований, а также информирование неспециалистов по вопросам конструктивного использования атомной энергии.

В первую очередь необходимо отметить, что текст данного издания не подвергся никаким изменениям. Даже в том случае, когда я пишу, что периодическая таблица пополнилась еще одним искусственно полученным элементом, названным ека-Holmium и считающимся 99-м элементом, я по-прежнему использую термин *атомная физика**, поскольку считаю его более общим и исторически более точным, чем недавно введенное в обиход выражение *ядерная физика*, несправедливо подчеркивающее теоретическую, а не экспериментальную сторону рассматриваемой науки.

В дополнение к сказанному выше мне хотелось бы только повторить заключительные слова из курса лекций, прочитанного мною на конференции лауреатов Нобелевской премии в Линдау и Институте им. Макса Планка в 1952 г.: «С точки зрения практического применения немногие открытия нашего века могут сравниться с открытием изотопов... и занимается этим вопросом сейчас не кто иной, как пионер в этой области профессор Георг фон Хевеши. Я, конечно, имею в виду использование им изотопов в качестве меченых атомов, особенно в биологических и медицинских исследованиях. В наши дни, когда стало возможным искусственное расщепление атома и когда человек способен по своей воле создать радиоактивные изотопы практически всех элементов... вряд ли следует сомневаться в том, что они станут для врача таким же благом, каким явились для хирурга лучи рентгеновского аппарата...»

* С целью избежать ненужной терминологической путаницы в данном переводе, в зависимости от контекста, термин Содди *isotopic* переводится как «атомный» или «ядерный». — *Прим. ред.*

Не исключено, что в будущем нас ожидают великие открытия в области исследования материи, но даже если этого не произойдет, уже имеющихся у человечества познаний достаточно для совершения выдающихся дел. Единственным важным условием для этого является ликвидация, пока еще не поздно, опасности новой войны. И пусть никто не сомневается относительно единодушной позиции ученых по этому актуальному вопросу.

Мне, конечно, приятно отметить, что моя работа «Концепция изотопов», отмеченная в 1921 г. Нобелевской премией в области химии, явилась основой для упомянутых выше медицинских исследований. А когда я слышу о столь широко известных ныне атомных электростанциях и так называемых реакторах-размножителях, используемых для преобразования урана-238 в полезный плутоний, то вспоминаю строки, написанные мною в 1903 г. Тогда, более 50 лет назад, я писал в «Современном обозрении» («Contemporary Review»):

«Атомная энергия, по всей вероятности, обладает несравненно большей мощностью, чем молекулярная энергия... и сознание этого факта должно заставить нас рассматривать планету, на которой мы живем, как склад взрывчатых веществ, обладающих невероятной взрывной силой».

В книге «Интерпретация радия» (1908 г.) я писал примерно на ту же тему следующее:

«Поколение, способное преобразовать материю, сможет растопить арктические льды и превратить всю планету в цветущий сад».

К этому, пожалуй, добавить нечего, разве что выразить надежду на то, что в наши дни, когда ученые и инженеры уже создали сложную технику для получения атомной энергии, люди во всем мире активно выступают за ускорение строительства атомных электростанций в развивающихся странах, с тем чтобы использовать на общее благо огромную энергию, которая, как я предсказывал, таится в атомах тяжелых элементов.

Фредерик Содди

Непосредственно история исследований атомной энергии, в отличие от истории исследований молекулярной энергии, почти полностью относится к XX в., и о ней пойдет речь в четвертой главе. В этой же главе, как и в двух последующих, сделана попытка дать краткий исторический обзор развития взглядов на природу материи, электричества, энергии в целом и энергии атома и молекулы в частности — т. е. практически всего того, что было достигнуто к концу прошлого столетия.

Автор считает полезным (не только для себя, но и для читателя) заново проследить зарождение понятий, столь актуальных для нас теперь, и то, как эти понятия развивались вплоть до момента открытия атомной энергии. В водовороте времени история прошлого нередко искажается, и история развития точных наук не является в этом смысле исключением. Размышления над ее калейдоскопическими изменениями позволят читателю-испециалисту лучше оценить огромную важность выдающихся достижений нашего века, которым посвящена остальная часть книги. Ведь если вдуматься, то история науки в конечном итоге превосхищает историю человечества.

Как известно всему миру, кульминационной точкой развития науки явилось создание в ходе второй мировой войны (1939—1945) атомной бомбы. Очевидно, именно военными обстоятельствами объясняется то, что первым плодом технической мысли в этой области явилась атомная бомба. Таким образом, человек научился высвобождать ядерную энергию в огромных количествах путем самопроизвольного разрушения атома, само название которого означает «неделимый». При относительно незначительных изменениях, происходящих в атоме, выделяется энергия, из которой черпает силу все живое на Земле, а также практически и вся неживая природа. Эти изменения, которые весьма несложно вызвать, проконтролировать и преобразовать, касаются только электронного уровня атомов, а не ядерного вещества, из которого эти атомы преимущественно состоят. В качестве обыкновенных физических и химических изменений материи они хорошо известны каждому человеку с рождения и поэтому не кажутся чем-то особенным.

До сих пор широкая публика знакоилась с теорией атомной энергии в основном по работам физиков, которым присуще глубокое убеждение в том, что именно их наука сыграла основополагающую роль в развитии этой теории. И это, видимо, вполне естественно, поскольку последние достижения в данной области стали возможны только благодаря развитию физики, а не химии или математики. Вместе с тем некоторые методологи, кстати не внесшие практически никакого вклада в последние достижения физики, набрались смелости переименовать «учение о радиоактивности» в «ядерную физику», а атомную энергию — в ядерную. Здесь сразу же следует отметить, что еще в 1902 г., когда физики толком не знали, что такое атом, и за десять лет до того, как появилась современная теория структуры атома, признавалось, что проблема искусственного высвобождения атомной энергии аналогична проблеме искусственной трансмутации, над которой с незапамятных времен безуспешно билась древние алхимики. В наши дни эта проблема частично решена, причем силами представителей всех областей физики, так что попытки кого бы то ни было настаивать на своем приоритете не могут не вызвать возмущения.

Являясь химиком по образованию и, кроме того, единственным оставшимся в живых из тех, кто участвовал в открытии и теоретической интерпретации атомной энергии, автор данной работы стремился в исторически верной последовательности проследить с момента зарождения все открытия и концепции, которые в той или иной степени внесли вклад в достижение конечного результата. При этом цель состояла в том, чтобы популяризировать, насколько это возможно, основные научные идеи, давая детальные разъяснения только в тех случаях, когда возникает необходимость проиллюстрировать их принципиально новый характер.

Несмотря на широко распространенное мнение о том, что исследуемый предмет слишком усложнен, в действительности он, как это ни странно, невероятно упрощен. В наши дни единственная сложность заключается только в огромном количестве и разнообразии существующих атомов. Исходя из этого, ошибочно было бы считать, что предмет нашего исследования доступен лишь специалистам. Усилия натурфилософов, пытавшихся с незапамятных времен свести окружающий нас мир к простейшим понятиям, в наши дни, наконец, начинают приносить плоды. Ранее же поиск простоты приводил к усложнениям, но это скорее парадокс, чем банальность, как это пытались представить.

Нет сомнения в том, что ядерная теория структуры атома в значительной степени помогла практическому решению проблемы искусственной трансмутации и ускорила его, однако она была всего лишь одной из предпосылок, необходимых для достижения прогресса. Открытие радиоактивности и естественно протекающей трансмутации радиоактивных элементов, существования изотопов и закона радиоактивных смещений, а также, в не меньшей степе-

ни, установление Эйнштейном взаимосвязи массы и энергии — все это было достигнуто независимо от развития теории структуры атома. Более того, именно эти открытия заставили ученых рассмотреть в новом свете всю историю физики вплоть до XX в.

Теории появляются и исчезают, поэтому современные ученые рассматривают их с прагматической точки зрения, обращаясь к ним только в тех случаях, когда они способствуют появлению новых знаний. Но факты, на которых основаны эти теории, неизменны. Ниже вниманию читателя предлагается краткий обзор по-новому осмысленных основополагающих знаний. Сюда, естественно, удалось включить только то, что оказало непосредственное влияние на науку нашего столетия.

Происхождение химии

Своими корнями химия уходит в глубокую древность. Слово *chemia* начали употреблять в IV в. н. э., а арабскую приставку *al* добавили к нему позднее. Таким образом, первоначально и химия, и алхимия занимались тем, чем ныне занимается первая из них, а именно изучением изменений и преобразований веществ. Правда, с самого начала алхимию ассоциировали с пресловутым искусством превращения обычных металлов в золото и серебро, однако подобные изыскания были логическим выводом из ложного, субъективного подхода господствовавшей в то время греческой философии к материальному миру. И только много позднее, в средние века, слово «алхимия» все более стало принимать особый смысл, вкладываемый в него современным человеком, который, хотя и знает, что подразумевается под этим словом, все же в повседневной жизни использует его, как правило, в переносном значении, имея в виду, например, «алхимию» банковских операций и т. п. Затем алхимию стали отождествлять прежде всего с поисками философского камня — магического талисмана, способного превращать практически неограниченные количества простых металлов в золото и серебро, а также волшебного эликсира от всех болезней, беспредельно продлевающего человеческую жизнь. Но опять-таки упоминания об этих идеях, хотя и в менее определенной форме, можно найти уже в древних вавилонских, халдейских, а возможно, и восточных философиях.

Закат алхимии начался с того момента, когда все свое внимание алхимики перенесли на поиск философского камня не для превращения металлов в золото, а для продления жизни человека. После промежуточного периода, известного как «иатрохимия», алхимия вышла из рамок сугубо технического и медицинского применения (период иатрохимии, известной ныне как *materia medica*, был начат Парацельсом (1493—1541), видевшим истинное предназначение химии не в получении золота, а в приготовлении ле-

карств). Со временем химия заняла свое законное место в одном ряду с уже утвердившимися физикой и математикой и зарекомендовала себя как подлинная наука, имеющая свой собственный предмет изучения. Первый, кто этому учил, был Роберт Бойль (1627—1691), остроумно прозванный кем-то из современников «отцом химии и дядей графа Коркского». Неизвестно, как насчет родства с графом, но то, что он является истинным отцом химии,— исторический факт.

Рассматривая историю алхимии с ранних времен, мы приходим к выводу, что она представляла собой значительное количество полезных практических знаний (не потерявших ценности и в наши дни), которые странным образом сочетались с совершенно извращенным теоретическим подходом, а также (что было вполне естественно для тех времен) с верой в магическое влияние звезд, добрых и злых духов на исход химических реакций. В свою очередь, вера в возможность трансмутации, равно как и отсутствие надежных методов анализа пробы благородных металлов для выявления подделок, создавали благоприятную почву для процветания обмана, софистики и фальсификации. Были периоды, когда алхимики находились в большом почете в королевских дворцах и использовались там как профессиональные отравители и фальшивомонетчики. Затем наступали периоды гонений, когда алхимики становились козлами отпущения и вынуждены были расплачиваться за подлые поступки своих нанимателей.

Согласно одной древней легенде, искусство облагораживания металлов было еще до всемирного потопа принесено на Землю демонами. Следы этой легенды можно найти в Библии (Бытие VI, 1—4), однако в более полной форме она дана в неканонической Книге Еноха (главы VI—IX).

В Европе Книга Еноха стала известна только в начале прошлого века благодаря найденной в Абиссинии эфиопской копии с утерянного ивритского или арамейского подлинника. Она представляет собой краткое описание событий, предшествовавших потопу, якобы пересказанных Енохом своему сыну Мафусаилу. Исследователи Библии считают, что Книга Еноха была написана между 200 г. до н. э. и 100 г. н. э. Существует также мнение, что это работа не одного, а нескольких авторов, которые, не осмеливаясь раскрыть свои имена, писали от имени древних пророков. В Книге Еноха излагается значительно измененная легенда о падении ангелов, позднее пересказанная Мильтоном в «Потерянном рае». В легенде рассказывается, как ангелы спустились на гору Хермон и, вступив в брак с женщинами, породили племя гигантов, которые взбунтовались и уничтожили человечество. Эти ангелы учили своих жен колдовству, искусству облагораживания и обработки металлов, изготовлению оружия, шлифованию и гранению драгоценных камней, а также получению всевозможных красителей.

По традиции принято считать, что алхимия зародилась в

Египте, хотя мы и не имеем никаких письменных доказательств этого. Объясняется это тем, что, во-первых, ремесло алхимии считалось в Египте священной наукой, держалось в строжайшем секрете и было доступно только жрецам. Лишь царские особы посвящались в ее таинства, и передавались секреты из поколения в поколение в устной форме, а не письменно. Во-вторых, после жестокого подавления восстания конца III в. н. э. римский император Диоклетиан приказал сжечь все египетские манускрипты о драгоценных металлах, дабы избежать в дальнейшем возможных выступлений против оккупации Египта римлянами. При этом он руководствовался повсеместно господствовавшим мнением о том, что Египет обязан своими богатствами алхимии. Однако в действительности эта страна черпала свое золото из нубийских золотых рудников (пуб по-древнеегипетски — «золото»).

Chemea — так называлась одна из местностей в Древнем Египте; но это же слово означало «черный» (отсюда, может быть, и пошло выражение «черная магия»). Однако фармацевты, вполне естественно, предпочитают возводить этимологию слова «химия» к греческим словам со значением «живительная влага» и «вливание». Согласно египетской традиции, родоначальником химии был Гермес Трисмегист, или «трижды величайший» (так неоплатоники называли египетского бога мудрости Тота, изображавшегося в виде змея; отсюда и произошло древнейшее название алхимии — «герметическое искусство», сохранившееся до наших дней в выражении «герметически заделанный» применительно к замазанному или запаянному шву, стыку). Гермес Трисмегист ближе всего стоит к древнегреческому Гермесу — богу науки и власти. Вполне вероятно, что от этого имени и происходит название «гора Хермон», о которой говорится в упомянутой апокрифической легенде.

На рис. 1 изображен Уроборос — змея, пожирающая свой хвост, которая в древности считалась символом единства материи. Буквами *r*, *j*, и *v* обозначены соответственно цвета красный, желтый и зеленый.

На рис. 2 изображена хризопея (или таинственные рецепты изготовления золота) Клеопатры из древнегреческого манускрипта, хранящегося в библиотеке собора святого Марка в Венеции. Эта иллюстрация, как и предыдущая, взята из книги М. Бергло «Введение в химию античности и средних веков» (1889)*.

Сравнение этих двух рисунков показывает, что Уроборос изображен на них по-разному. Рис. 2 снабжен греческим девизом «Целое едино». В нижней правой части рисунка изображен перегонный куб (прибор для дистилляции), расположенный на плите с греческой надписью «огонь»; из двух наклонных труб капает жидкость. Таким образом, цель рисунка — показать, как протекает

* Berthelo M. Introduction à la Chimie des Anciens et du Moyen Age, published by Georges Heinhell, Paris, 1889.

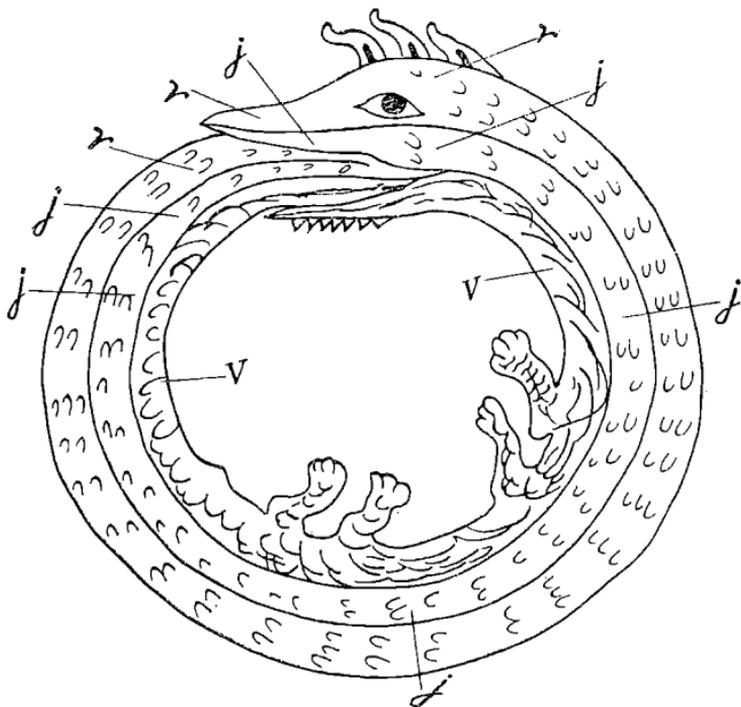


Рис. 1. Уроборос — змея, пожирающая свой хвост (из древней мифологии)

процесс дистилляции. Другие обозначения на рис. 2 — это магические символы, которыми алхимики обозначали металлы. Бертло считал, что символы в правом верхнем углу олицетворяли процесс превращения свинца в серебро. Клеопатра, так же как и Мария Еврейская, были представительницами александрийской школы алхимиков начала нашей эры.

Эти дошедшие до нас свидетельства древней алхимии датируются III—VII вв. н. э. и, вероятно, являются транскрипциями и переводами алхимических рецептов и формул. Происхождение многих из них Бертло проследил вплоть до времени написания папируса, найденного в Фивах, который, по всей видимости, был запрятан в бинтах мумии и, таким образом, не попал в руки римлян и злополучных фальсификаторов истории. Этот папирус, содержащий записи двух человек — мага и ремесленника, занимавшегося подделкой металлов, является старейшим из дошедших до нас

κλεοπατρικη χρυσωσις

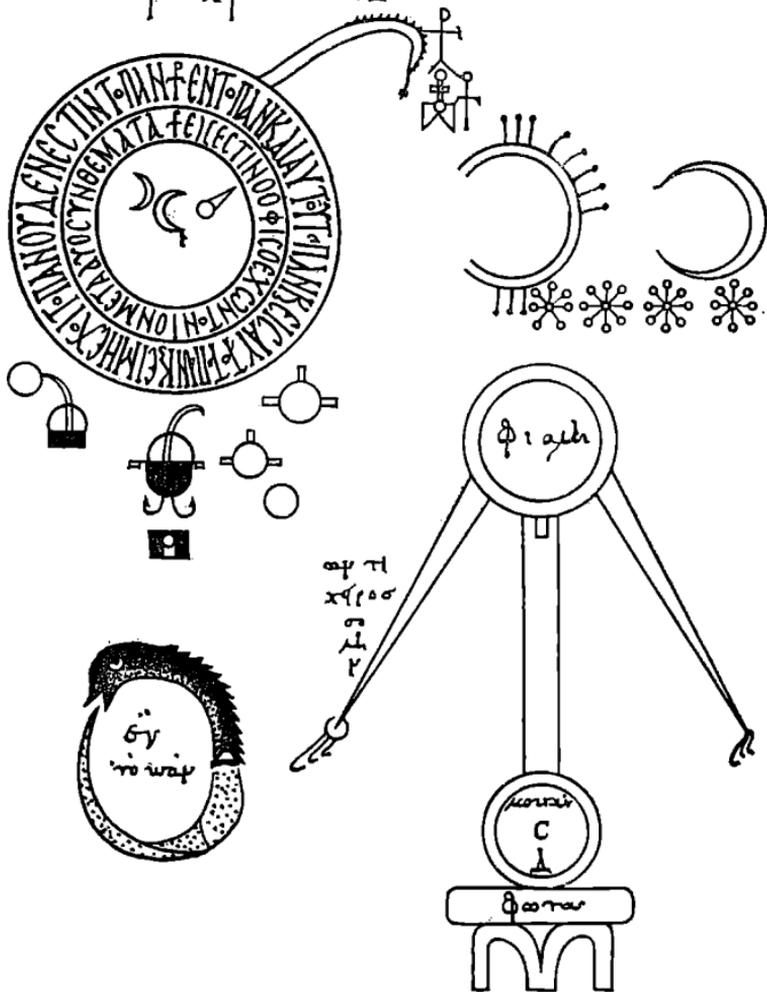


Рис. 2. Хризопея Клеопатры (рецепты изготовления золота)

документов, датируемых III в. н. э. С уверенностью можно сказать, что в начале нашей эры в Александрии процветала школа алхимиков, в которую входило несколько женщин, писавших трактаты по вопросу искусства выплавления и «окрашивания» («трансмутирования») металлов, окраски стекла и крашения тканей. Как это ни странно, александрийские алхимики считали себя учениками древнегреческого философа Демокрита (I в. до н. э.), которого обычно принято считать основателем древнегреческой атомистической теории и речь о котором пойдет дальше. Поскольку это единственная связь атомистики с алхимией, а идеи трансмутации скорее вытекают из теории непрерывности материи, чем из представлений о прерывности, то Демокрит, скорее всего, сам бы решительно отрекся от таких «учеников»!

Химия в древности

Практические познания древних в химии были весьма основательными, и последовавшие затем двадцать веков алхимии не прибавили к ним почти ничего нового. В первую очередь это касается изучения свойств металлов. Самородное золото и серебро были известны с давних времен и особо ценились за такие качества, как плавкость, ковкость, неизменяемость свойств под воздействием огня — т. е. за то, что давало возможность их легко обрабатывать. Искусство купелирования, т. е. удаления примесей из золота при помощи свинца, было известно уже во II в. до н. э., а вот отделять золото от серебра научились только в начале нашей эры. Сплав этих двух металлов, названный египтянами *асем*, а греками *электрум*, считался особым металлом. Медь, главным образом в сплаве с оловом (бронза), была известна еще в эпоху неолита. Однако современную классификацию доктора Дэша, металлурга по профессии, согласно которой бронзовый век предшествовал железнному, нельзя считать безоговорочно правильной. Все зависит от того, какой из этих двух металлов существовал в доступных местах в виде легкоплавких руд, т. е. окислов и карбонатов, а не сульфидов. Уже 5000 лет тому назад железо использовалось в Египте и, возможно, в некоторых других странах Древнего Востока. Делийскую стальную колонну высотой 7,32 м и диаметром 40 см, создание которой датируется 400 г. до н. э., по справедливости следовало бы назвать восьмым чудом света, поскольку выковать такой столб чрезвычайно трудно и в наши дни, даже для тех, кто создает сверхсовременную военную технику.

Римляне широко использовали свинец при изготовлении водопроводных труб, и им был известен способ паяния при употреблении сплава олова со свинцом, хотя они, по-видимому, и не различали эти два металла, считая их сплав разновидностью свинца. Сурьма, и как металл, и в форме сульфида (стибнита), была из-

вестна с древнейших времен и находила самое разнообразное применение. Так, стибнит использовался в косметике, а из чистой сурьмы, как выяснилось, изготовлены халдейские вазы. Секрет изготовления стекла был открыт в Древнем Египте после того, как соду начали использовать в качестве флюса при выплавке металлических руд, загрязненных песком. Свои изделия египетские гончары окрашивали и эмалировали окислами меди и олова, которые, кроме того, применялись для изготовления искусственных драгоценностей. Что же касается фарфора, то в древние времена он был известен только в Китае, одновременно с Египтом пережившем эпоху алхимии, которая, может быть, и была занесена туда из Александрии.

В древности было также хорошо известно изготовление красок, мыла, сахара, крахмала, скипидара; использование процесса брожения для производства пива, вина, уксуса, хлеба; гашение и обжиг извести в строительном деле и множество других процессов. В III в. н. э. уже умели получать ртуть (из сульфида, кино-вары) дистилляцией с помощью железа; применяли ее не только в амальгаме с золотом при золочении, но также и в обратном процессе, т. е. при восстановлении этого металла из отслужившей позолоты. Перегонный куб для дистилляции был усовершенствован еще александрийскими алхимиками, но использовать его для производства спиртных напитков стали только в начале нашей эры. Впоследствии арабские алхимики применяли этот куб для получения спирта для изготовления фармацевтических препаратов.

В течение почти тысячи лет, предшествовавших христианской эре, Александрия была мировым центром научной мысли, не имевшим себе равных. Однако к V в. н. э. александрийская цивилизация пришла в упадок из-за религиозных распрей между евреями, христианами и язычниками, во время которых была убита Ипатия (415 г.) — прототип нашей современницы Марии Кюри. Двумя веками позднее Александрию захватили сарацины. Во время захвата фанатичные магометане сожгли знаменитый Серапеум с его бесценной библиотекой, книгами из которой, согласно широко распространенному, но недоказанному преданию, в течение полугодя топили бани. Так были безвозвратно утеряны все сведения о происхождении алхимии, собранные Диоклетаном.

Тем не менее в поразительно короткий срок завоеватели превратились из варваров в ревностных хранителей науки и культуры, и, таким образом, после падения Египта, Греции и Рима они явились продолжателями цивилизации, ими же свергнутой. К X в. они создали тройственную империю со столицами в Кордове, Каире и Багдаде. Основанные ими университеты, особенно в Испании, привлекали студентов из всех частей Европы. Вернувшись домой, они распространяли полученные ими знания у себя на родине. В Европе, как и в Византийской империи на Востоке, где также наша пристанище египетская алхимия, стали всемерно развивать

химическую науку, все больше связывая ее с медициной, и, таким образом, к концу XIII в. алхимия достигла своего наивысшего расцвета по всей Европе.

Наиболее известным из арабских алхимиков был Гебер (как показали современные исследования, под этим именем выступали сразу два человека — учитель и ученик, жившие во второй половине VIII в.). Арабские алхимики открыли ранее неизвестные ученым минеральные кислоты, которые сейчас мы называем соляной, азотной и серной. Они также в значительной степени развили учение о солях, утверждая, в частности, что всем им присуще свойство растворяться в воде. Однако общий подход к этому предмету представлял собой странную смесь химии, колдовства, предсказаний и знахарства. За исключением нескольких новых идей, о которых пойдет речь дальше, учение арабских алхимиков о происхождении элементов и их теоретическое осмысление природы по-прежнему оставались в корне неверными. В то же время, по мере роста популярности фармакологии, аптечные лавки к XI в. стали появляться сначала в Испании, а затем в Италии и Германии, что проложило дорогу современной химии.

Атомистическая теория древних греков и ее извращение

Теперь, когда мы знаем, что имеющихся — из известных нам — в древности средств было явно недостаточно для осуществления подлинного превращения одного элемента в другой, кажется парадоксальным, что атомистическую теорию создали именно древние греки. Более того, созданная ими теория совпадает в общих чертах с современными концепциями, которые отличаются от господствовавшей в XIX в. теории Дальтона. По всей вероятности, древние греки заимствовали свои знания в области математики, астрономии и геометрии у египтян, халдеев и индусов, а затем развили имевшиеся у них представления в подлинные науки, стремясь скорее к достижению новых знаний ради знаний, а не к их практическому использованию. Что касается египетской алхимии, то здесь древних постигла неудача. Не создав истинной науки, они практически превратили ошибочные, а может быть и умышленно искаженные, доктрины, касающиеся иерархии превращений обычных металлов в золото и серебро, в теоретические аксиомы и трюизмы. Таким образом, в течение 2000 лет химия была обречена на бессмысленную погоню за несбыточной мечтой.

Хотя автору и не пришлось ознакомиться с греческими первоисточниками, все же у него сложилось впечатление, что по своей сути атомная теория древних греков первоначально, по-видимому, представляла собой отрицание и даже альтернативу преобладавших на Востоке взглядов на первичное строение материи. Скорее

всего, их отношение к этой теории явилось составной частью того подхода к окружающей природе, который сделал греческую математику, особенно геометрию, важной вехой на пути развития цивилизации. Но посеянные ими семена не проросли. И не потому, что попали в каменистую почву, а потому, что их задушили сорняки. Люди, называвшие себя последователями и учениками первых греческих атомистов, по сути дела вывернули наизнанку и извратили их теорию. И хотя по современным стандартам сама эта теория представляется слишком гипотетичной и неконкретной, все же это — на редкость точное предвидение. Итак, рассмотрим ее основные принципы.

Создание атомистической теории обычно приписывается Демокриту (470—357 гг. до н. э.), ни одна из работ которого до нас не дошла. Однако историки утверждают, что основателем теории является учитель Демокрита — Левкипп, отказавшийся от доктрины так называемых аристотелевых элементов, согласно которой изначальными составными частями материи являются земля, воздух, огонь и вода. Вместо этого он считал, что материя состоит из отдельных частиц (атомов), находящихся в пустом пространстве и слишком мелких, чтобы их можно было увидеть в отдельности. Немногочисленные сведения о теории Левкиппа в основном известны из латинской дидактической поэмы Лукреция (95—55 гг. до н. э.) «О природе вещей». Во-первых, следует отметить, что, согласно этой теории, атомы непрерывно движутся в пустом пространстве (в отличие от неподвижных атомов Ньютона, Лавуазье, Дальтона) и воздействуют друг на друга при помощи толчков и давления, а не посредством «любви» и «ненависти» (притяжения и отталкивания), как считали восточные мудрецы. Во-вторых, изменения вещества происходят благодаря соединению и разъединению атомов, а также в зависимости от свойств атомов, вступающих во взаимодействие. И наконец, различные свойства вещества объясняются формой и размером атомов, а не разницей в их массе (как в атомистике Дальтона)

По крайней мере, эта первая дошедшая до нас атомистическая теория позволила дать точное определение атому как мельчайшей частице любого однородного вещества. Химия как наука, детально изучающая свойства вещества, нуждается в том или ином виде атомистики, подобно тому как селекция нуждается в изучении одного-единственного зерна, а не всего урожая. Под термином *частица* следует понимать единицу, обладающую определенными свойствами, и иметь в виду, что ее дальнейшее деление приводит к исчезновению этих свойств и появлению новых.

Как и современная теория, эта типичная для раннеионической философии концепция подразумевает веру в некую первоначальную объективную сущность, из которой в конечном итоге все и возникает. Ведь если бы атомы были созданы из разного материала, излишне было бы объяснять свойства веществ их формой и

размером! Эта первоначальная сущность имеет материальный характер и может быть названа *противом* (согласно выражению ученого прошлого века В. Крукса). Первый из известных нам греческих философов Фалес (640—548 гг. до н. э.) считал, что противом является вода. Другие философы того времени приписывали эту роль воздуху или огню, а последователи Пифагора (570—500 гг. до н. э.) принимали за первооснову число, выражающее гармонию, порядок и ритм, — и это явилось первым шагом на пути в преисподнюю нереальности.

По иронии судьбы, от этой столь интересной для современной науки теории первым отказался не кто иной, как ученик Демокрита Протагор (480—411 гг. до н. э.). Он решительно отбросил «атом» как гнилую картофелину, и тем самым внес раскол между философией гуманитарных и философией естественных наук. Этот раскол до сих пор не удалось преодолеть, и именно он явился причиной всех бед, сопутствовавших науке на ее нелегком пути познания природы. Ведь Протагор отбросил в сторону не только «атом», но и весь материальный мир. Греческую науку он превратил в агностицизм, утверждая, что невозможно знать суть вещи такой, какой она действительно является, ибо ее восприятие зависит от наших впечатлений о ней. Именно Протагору принадлежит знаменитый афоризм: «Человек есть мера всех вещей»; он впоследствии претерпел многочисленные толкования, суть которых, однако, сводилась к тому, что центральное место во Вселенной занимает человек. Но при всей своей кажущейся применимости к жизни человека в отношении к окружающей природе и нашим познаниям о ней это высказывание является голой софистикой, и сегодня оно звучит как бред самонадеянного маньяка.

Греческий агностицизм, этот чисто субъективный и пораженческий подход к окружающему миру, был впоследствии подхвачен и развит более известными нам философами V—IV вв. до н. э. — Сократом, Платоном и Аристотелем. Первый из них на основании некоторого изучения природных явлений провозгласил, что поскольку истинное познание невозможно, то и стремиться к нему бесполезно. В конечном итоге Сократ пришел к выводу, что всю Вселенную, одушевленную и неодушевленную, следует рассматривать как созданную для того, чтобы удовлетворять потребности человека. До сих пор эта точка зрения находит много сторонников! Платон пошел еще дальше, распространив господствовавшую в Древней Греции теорию о единой первоначальной сущности не только на материальный мир, но и на сознание, рассматривая их как единое целое. Но и его не интересовали окружающая действительность и познание ее. Что же касается последователя и ученика Платона Аристотеля, перенесшего агностицизм своих предшественников на мир вещей и чей авторитет в науке до XVI в. был непререкаем, — то именно ему мы обязаны тем, что так глубоко и надолго укрепилась вера в доктрины алхимиков и трансмутацию.

Как бы ни истолковывалось до Аристотеля значение четырех основополагающих «элементов», лично он рассматривал их не как материальную сущность или ее составные части, а как *качества* или *свойства*. Согласно Аристотелю, эти элементы в действительности представляли собой четыре возможные комбинации двух качеств — тепла, влажности и их противоположностей — холода и сухости, взятых попарно. Например, огонь — сухой и горячий; воздух (пар) — влажный и горячий; земля — сухая и холодная, а вода — влажная и холодная. К ним он прибавлял пятый элемент — квинтэссенцию, имеющую эфирное происхождение и проникающую повсюду. Нечто подобное можно найти и у Будды, только там вводится еще шестой элемент — сознание. Исходя из того, что единственным источником знаний о реальном мире вещей является наше чувственное восприятие их, проблема конечного строения материи Аристотелем не рассматривалась. Материя считалась всего-навсего орудием (посредником) для проявления свойств, а «элементы» — простейшими телами определенного качества, из которых формируется материя. Коль скоро свойства так легко изменяются, то нет ничего иррационального в предположении, что свинец может быть обращен в золото. Такие поверхностные представления процветали среди философов того времени не в меньшей степени, чем среди неграмотных ремесленников, которых ученые мужи презирали за столь низменное занятие, как превращение сырья в полезные продукты.

Последователи Аристотеля считали, что нежелаемые свойства могут быть одно за другим заменены желаемыми. Так появился термин *окраска* металлов, появление которой указывало на изменение свойства вещества. Нагревание меди и каламина (карбонат цинка) приводит к образованию латуни — в этом видели первую ступень на пути превращения меди в золото. Роджер Бэкон (1214—1294 гг.), ссылаясь на свойства золота (его цвет, высокую плотность, ковкость и т. д.), заявил, что «те, кто знают рецепты и обладают достаточной практикой в деле получения этих свойств по желанию и преобразования их в любое промежуточное вещество, могут получить золото». Современный ученый не преминул бы задать вопросом: почему же в природе не найдено это самое промежуточное между свинцом и золотом вещество, в то время как оба эти элемента существуют самостоятельно?

Все же арабские алхимики сумели приблизиться к реальности на один шаг. Они заменили четыре аристотелевых элемента тремя: «ртутью», «серой» и «солью», выражающими соответственно металлические свойства, изменения под воздействием огня и растворимость в воде. Но хотя они и рассматривали эти элементы с более современной точки зрения — как материальные компоненты, — все же это были не ртуть, сера и соль в нашем понимании, а их идеализированные формы, олицетворяющие только основные качества самих веществ.

На пороге своего заката алхимия становилась все более и более фантастичной. Существует немало обстоятельных описаний того, как авторитетнейшим ученым того времени удавалось получить золото. Однако при проверке выяснялось, что все предметы, якобы сделанные из искусственного золота, были просто-напросто подделками. Нет сомнения в том, что обманутые учеными мужами люди оказались такими же жертвами, как те, кто сейчас верит в «золотоносность» соляных приисков. Что же касается эликсира жизни, то в средние века даже долголетие библейских патриархов объясняется их знанием алхимии.

В свое время автор этих строк уже привлекал внимание к одному факту*, который любопытен и теперь: несмотря ни на что, даже в наше время при небольшом воображении можно вполне примириться с идеей философского камня. Ведь если при трансмутации выделяется неистощимый запас энергии, без которой все живое умирает, то, стало быть, этот процесс и является истинным эликсиром жизни. Во многих древних легендах, если их рассматривать буквально, а не с точки зрения мистики, содержатся намеки на то, что человечество развивается по пути, ранее им уже пройденному, следовательно, все эти мифы могут являться единственными сохранившимися следами каких-то древнейших эпох. В преддверии известной нам истории Древнего Египта существовала некая высокоразвитая цивилизация, широко применявшая на практике научные достижения, которые египтяне хранили как государственный секрет. Если новая глобальная катастрофа уничтожит нынешнюю цивилизацию, то вполне резонно предположить, что наука отдаленного будущего будет находиться на определенном этапе своего развития в таком же состоянии, как и в Древнем Египте. Уже первые основополагающие знания, часто становившиеся государственным секретом, могут быть легко утеряны или сохраниться лишь в форме неясных и антропоморфических легенд. Однако практическая сторона науки, оторванная от своей философской основы, может частично сохраниться. Уже сейчас представляются неизбежными (а возможно, уже и предпринятыми) первые роковые шаги на пути превращения науки в государственную тайну, принадлежащую иерархии, которая, вне всякого сомнения, в конечном итоге эгонистична.

Появление экспериментальных наук

Как уже отмечалось, Роберт Бойль был первым, кто, выражаясь его собственными словами, «рассматривал ремесло не как физик или алхимик, а как философ». В своей знаменитой книге «Химик-скептик» он дал четкое определение химическим элементам

* The Interpretation of Radium. By F. Soddy London, John Murray, 1909. See chapter XI.

как неделимым компонентам материи. Это определение не утратило своей актуальности и в наши дни. Бойль правильно предвидел, что количество известных человеку элементов значительно возрастет и что элементы, которые его современники считают однородными, на поверку окажутся соединениями. Наконец, именно Бойлю принадлежит мудрая мысль о том, что перед тем, как переходить к обобщениям, необходимо изучить химические элементы в отдельности. Он первым провел четкую грань между химическим соединением и простой смесью, поставив опыт, который доказал, что при химическом соединении происходит полное изменение свойств, а в простых смесях никакого изменения не происходит. Кроме того, Бойль широко известен благодаря закону, который носит его имя и имя Мариотта. Согласно этому закону, объем газа зависит от давления, и вместе с открытым позднее законом Гей-Люссака, устанавливающим зависимость объема от температуры, он входит в так называемые основные газовые законы. В современном виде эти два закона, будучи объединены, выглядят так: $pV = RT$, где p — давление, V — объем, T — абсолютная температура и R — постоянная величина.

Более чем столетний период, отделяющий Бойля от Лавуазье (1743—1794), погибшего в годы французской буржуазной революции, является одним из самых запутанных и неправильно истолковываемых периодов в истории науки. Его обычно называют *периодом флогистона* — по названию бытовавшей в то время теории горения, которую низверг Лавуазье. Однако Бойль не был приверженцем теории флогистона; правда, она, хотя и была прямой ветвью алхимии, все же эта теория дала много нового и интересного.

Древние делили вселенную на осязаемый, мыслимый и видимый (т. е. материальный), и неосязаемый, немислимый и невидимый (т. е. духовный) мир. Газы помещались где-то посередине; что касается энергии, то ее определенно приписывали некоему мистическому миру, поскольку ранние божества — Тор, Вулкан, да и сам Юпитер — были самыми настоящими олицетворениями физической энергии.



Рис. 3. Роберт Бойль (1626—1694)

Химия как наука начиналась с так называемой пневматики, т. е. с признания того, что газы являются не различными видами воздуха, а отличными друг от друга веществами. Другим, менее важным для нас, отправным пунктом для развития химии было объяснение природы солей как соединения кислот с основаниями*. Случилось это за сто лет до того, как восторжествовала теория Лавуазье, согласно которой окисление (например, дыхание и прокаливание металлов) заключается в соединении горящего вещества с кислородом воздуха, а не в распаде веществ на элемент, участвующий в окислении и называемый флогистонем, и продукт горения.

Что же касается газов, то учение о них было заложено в XVI в. голландским алхимиком ван Гельмонтом (1577—1644 гг.), который ввел в обиход слово *газ* (от немецкого *geist* — дух, призрак). Первое упоминание о том, что газы имеют массу, содержится в исследованиях ван Гельмонта о потере массы углем при сгорании. Ван Гельмонт показал, что образующаяся при этой реакции двуокись углерода — тот самый газ, который получается в результате разложения мела под воздействием кислот и заполняет пещеры и шахты. Среди многочисленных алхимических представлений об элементах мы находим у ван Гельмонта первые зародыши современной точки зрения о том, что элементы продолжают существовать в соединениях, подобно тому как соль существует в соленой воде. Бойль также знал, что при превращении металлов в окислы наблюдается увеличение массы и что при дыхании и прокаливании часть воздуха исчезает, а остаток не может поддерживать процесс горения.

Ученый Мейов (1640—1679 гг.), проделав серию самых замечательных в XVII в. опытов по изучению горения, доказал, что в литре имеется газ, поддерживающий процесс горения, и что этот газ связывается сурьмой, которая при этом увеличивается в массе. Часть воздуха, участвующего в горении, превращает темно-красную венозную кровь в ярко-красную артериальную. Исходя из этого, Мейов объяснял теплокровность животных организмов именно абсорбцией селитряного газа. Можно с уверенностью сказать, что если бы не его ранняя смерть в возрасте 39 лет, Мейов пришел бы к тем же выводам, что и Лавуазье в конце следующего столетия.

В XVII в. предполагалось, что один из «элементов» материн является носителем горючести; однако ван Гельмонт отрицал это на том основании, что огонь не может быть материальной субстанцией. Немецкий алхимик Бехер в 1669 г. возродил это предположение, облачив его в более конкретную форму. Он считал, что «огненный элемент» (*terra pinguis*) во время горения улетучивается.

* Marsh J. E. The Origins and Growth of Chemical Science. London, John Murray, 1929.

В начале XVIII в. Шталь (1659—1734 г.) пересименовал его во флогистон и, что более важно, расширил границы этой теории, указывая на то, что во многих случаях сгоревшие вещества превращаются, так сказать, в «негоревшие» при нагревании их с восстановителями. Так, к примеру, окисел металла при нагревании с углеродистыми материалами «возрождается» как металл, равно как и сера регенерируется из серной кислоты и сульфатов.

Ни в одном столетии вы не найдете более блестящей плеяды химиков, чем те, которые верили во флогистонную теорию горения. Среди них были Пристли, Кавендиш, Шееле, Маргграф, Бергман; все они, кроме Блэка, верили в эту теорию до конца своих дней. Эта вера особенно укрепилась в них после того, как экспериментальные открытия и свидетельства подтвердили теорию окисления Лавуазье. Интересен тот факт, что они сами же и обеспечили эти свидетельства. Именно их работам мы обязаны тем, что после того, как Стефаном Гейлсом (1667—1761) был открыт метод собирания газа (рис. 4), не известный ван Гельмонту, такие газы, как углекислый, кислород, хлор, болотный газ (метан), а также газы, полученные впервые Пристли собиранием над ртутью (аммиак, хлористый водород, двуокись серы и тетрафторид кремния), были признаны существующими самостоятельно. Теперь для того, чтобы их различать, использовали не только их специфические химические свойства, но также и их плотность. В этой области замечательных достижений добился Кавендиш (1731—1810). Прежде же отношение к этим газам было сугубо догматическим, т. е. учитывались только качественные факторы, а количественные полностью игнорировались.

Следует отметить, что историки химии и сами химики неправильно оценили и назвали первую эру научной химии. Это произошло в основном по двум причинам.

Во-первых, для Штала и его предшественников — основоположников этой теории флогистон был элементом в аристотелевом понимании, а не в трактовке Бойля. Лишь последователи Штала, под растущим влиянием взглядов Бойля, защитником которых был сам Шталь, стали считать флогистон компонентом материи, а не элементом, обеспечивающим воспламеняемость. Хорошо известно, что к окончательной победе теории окисления привела ошибка Кирвана, принявшего водород, открытый Кавендишем, за флогистон. И именно Кавендиш, а не Лавуазье первый доказал, что вода — это не элемент, а соединение водорода с кислородом (который был только что открыт).

Во-вторых (и это еще менее простительно), ошибочно считается, что уже тогда был установлен закон сохранения материи, в то время как к установлению этого закона как раз и привели противоречия между сторонниками и противниками теории флогистона. Кроме того, хотя никто не сомневается в необходимости знания химиками того факта, что окисление есть результат соединения ве-

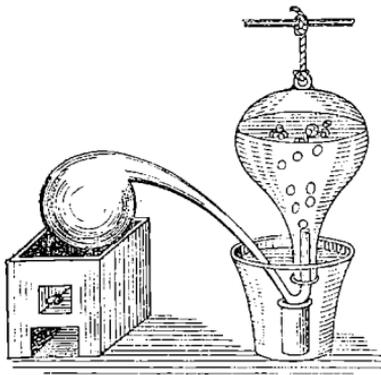


Рис. 4. Первый пневматический прибор для собирания газа Стефана Гейлса.

ществ с кислородом, любому человеку интересно знать, как получается свет и тепло в процессе горения. Именно для этого, а не для объяснения увеличения массы был первоначально придуман флогистон, который, кстати сказать, последователи Лавуазье окрестили в XIX в. «теплородом». По лаконичному выражению профессора Эдинбургского университета конца прошлого века Крума Брауна, — замени флогистон энергией, и работы флогистиков из алхимической чепухи превратятся в современную теорию. Хотя Лавуазье и доказал, что во время горения масса сохраняется, это никоим образом не повлия-

ло на теорию флогистона в ее первоначальном виде. Он также установил, что вещество, названное им «огненным», не имеет массы.

Фактически эта эпоха явилась полем боя двух идей, соревновавшихся за право на существование: идеи сохранения энергии и идеи сохранения массы. В наши дни, как мы увидим дальше, эти два закона сохранения были объединены Эйнштейном в один, и, хотя, может быть, неправомерно сказать, что энергия и масса идентичны, они все же взаимобратимы. Мысль Штала о том, что свойство окисления обратимо, и можно добиться восстановления окислов, была достаточно ясной, хотя и несовершенной предшественницей закона сохранения энергии, который получил всеобщее признание только в середине XIX в.

Оставаясь до конца верными своим убеждениям, невзирая на очевидный перевес в сторону соперничающей точки зрения, флогистики первыми предположили существование совершенно новой категории в материальном мире, которая неосознаема, невидима, невесома и которую, однако, невозможно ни создать, ни уничтожить.

Как утверждают более поздние историки, Лавуазье очень болезненно относился к блистательным экспериментам своих современников, стоящих на других позициях, а возможно, и ко всем открытиям, кроме собственных. Зачастую он не признавал первенства работ других ученых, даже если его лично знакомили с этими работами перед публикацией. В то же время известно, что нередко эти работы предвосхищали или непосредственно влияли на его выводы. Обращаясь с ними подчеркнуто пренебрежительно, он в то

же время скрупулезно выискивал в них малейшие недостатки, с тем чтобы дискредитировать их. Этим он несколько запятнал блеск славы, которой был окружен, и которая была идеализирована восхищенными соотечественниками.

С другой стороны, его наиболее ценный вклад в науку или, по крайней мере, наиболее важный результат его исследований практически не получил признания вследствие целого ряда исторических извращений. Тем не менее именно введенный им метод количественного подхода, равно как и доказанное им положение о сохранении массы предопределили неизбежность признания существующей ныне атомистической теории, согласно которой атомы классифицируются по своей массе и химической природе. Ранее же эта теория находилась вне поля зрения научной химии, и даже после официального признания ей долго не доверяли; объяснить это можно скептическим отношением к поспешным обобщениям Бойля, а также ошибочным отождествлением греческого атомизма с доктринами алхимиков.

Именно поэтому важное значение приобретает тот факт, что Лавуазье, который был в первую очередь физиком, а не химиком, пришел к своим выводам о сохранении массы не в одиночку. Но опять-таки, возможно, это объясняется тем, что изучение химических реакций не представляло для него особого интереса. В области химии он не сделал самостоятельных открытий. И хотя названная его именем кислородная теория в свое время значительно продвинула химию вперед, она просуществовала недолго, поскольку в скором времени ведущая роль перешла к открытому Кавендишем водороду. Впоследствии, когда появилась теория электролитической диссоциации Аррениуса, кислотность стали отождествлять с «гидроном», т. е. положительно заряженным ионом водорода, который ученые XX в. сочли необходимым переименовать в протон, исходя из его центрального положения в структуре атома, хотя в кислотах, подобно любому другому иону, он ведет себя как простая молекула. Наличие у одной вещи двух названий вносит путаницу, однако еще хуже, когда одна и та же вещь играет абсолютно разные роли. Как это часто случается, возражения против названия «протон» оказались оправданными, и в наши дни выяснилось, что «протоном» было названо то, что должно было быть названо «нейтроном». Сам же «протон» представляет собой соединение нейтрона с позитроном (т. е. положительно заряженным электроном).

Наиболее наглядной иллюстрацией преимуществ количественного метода исследований является ранний опыт Лавуазье, с помощью которого он чисто физическим путем выявил одно из заблуждений древнегреческих химиков. В древности полагали, что при нагревании вода переходит в воздух (в виде пара) и в землю (в виде осадка растворившегося вещества). Эта вполне очевидная трансформация тех «элементов» материи, которые древние считали

основополагающими, вероятно, и навела их на мысль о возможности трансмутации. Лавуазье же обнаружил, что если в течение длительного времени кипятить воду в закупоренном стеклянном сосуде, то изменения в массе не произойдет. Однако при выпаривании воды масса сконденсированных паров равна массе, потерянной водой в сосуде. Точно таким же способом он установил, что флогистон, названный им теплородом, не имеет массы. Ведь если легкоплавкие металлы прокаливать в закупоренном сосуде, первоначально содержавшем воздух, изменения в массе не произойдет до тех пор, пока сосуд не будет открыт и в него не проникнет воздух в объеме, равном объему поглощенного металлом кислорода. В отличие от Лавуазье при решении той же проблемы Шееле использовал качественный метод. Ему удалось выявить заблуждения химиков древности путем химического анализа осадка, оставшегося после выпаривания воды, и доказательства того, что состав осадка идентичен составу стекла.

Глава вторая. СОВРЕМЕННАЯ АТОМНАЯ И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ТЕОРИИ

Простые законы химического соединения дают так называемые химические эквиваленты, или относительные массовые пропорции, в которых при образовании соединений соединяются друг с другом все элементы. Это чисто экспериментальные постоянные, которым, в соответствии с неизвестным количеством разновидностей атомов, составляющих соединение, должны быть кратны относительные массы атомов элементов. Например, если, используя заглавные буквы в качестве символов атомов, обозначить воду НО, то при эквиваленте кислорода, равном в единицах эквивалента водорода 8, атомная масса кислорода была бы 8, если считать атомную массу водорода за единицу. Если же вода H_2O , как и есть на самом деле, то атомная масса кислорода равна 16, и т. д. Но как раз это и было неизвестно, что уже порождало неопределенность, и, до тех пор пока в последней трети прошлого века не был открыт периодический закон, в химической атомной теории не имелось определенного критерия для оценки гипотезы атома, так что почти до конца столетия некоторые аналитики отказывались пользоваться атомными массами, предпочитая формулы, составленные на основе химических элементов, как, например, для воды НО, а не H_2O .

Наиболее важной причиной того, что в течение долгого времени атомная теория не могла достичь положения неоспоримого закона, а оставалась сложной, путаной и гипотетичной, было то, что в XVII в. существовали две самостоятельные теории, пытавшиеся утвердиться в одно и то же время, причем химики и физики долго не имели окончательного представления об их точном соотношении. Это были химическая и физическая теории. Теперь они называются соответственно атомной теорией и молекулярной теорией, хотя

последняя называлась физиками атомной теорией еще в начале этого столетия. Так, президентская речь сэра Артура Рюккера на заседании Британской Ассоциации имеет именно такой заголовок, хотя и в ней не было ничего относящегося к атомам в современном и общепринятом понимании этого слова. Так как химическое превращение более фундаментально, чем физическое, атом всегда можно легко определить как неделимую, единичную частицу элемента, принимающую участие в химических превращениях и обменах. Молекулу, в свою очередь, нельзя больше, даже умозрительно, связать с идеей раздробления, если рассматривать ее в качестве элементарной частицы вещества соединения, или «атома соединения», как ее называли вначале. Она была конечной частицей в том смысле, что при дальнейшем ее делении соединение разрушалось бы на составляющие элементы и прекращало бы свое существование как таковое. Термин «молекула» все еще часто используется в этом довольно-таки неточном смысле; но современное определение молекулы в достаточной степени противоположно определению атома на той основе, что она является физической частицей вещества, имеющей самостоятельное, или свободное длительное существование. Это равным образом относится к определенному, вышедшему атому соединения, в газообразном или жидком состоянии, к микроскопической частице, свободно суспендированной в жидкой эмульсии, к пылинке, плавающей в солнечном луче, или к частице туманности. Действительно, астрономы отнюдь не по своей прихоти, а из стремления следовать строгому определению часто рассматривают вселенную отдельных звезд как собрание молекул. Фактически это существенно новое представление, совсем не очевидно связанное с идеей дробления, или дискретности, вещества, но проистекающее из так называемого закона равномерного распределения энергии, ставшего известным только намного позднее. Согласно этому закону, чисто экспериментальной частицей является именно молекула. Но раньше не понимали, что так называемые «атомы» обычных элементарных газов с таким же успехом могут находиться в свободном состоянии, как и атомы газовых соединений. Эти газообразные элементы существуют в форме мельчайших частиц соединения, или молекул, в которых соединены два или более одинаковых атома. Химическую инертность газообразного азота следует приписать тому, что атомы этого элемента предпочитают соединяться друг с другом, а не с какими-то атомами других классов. Современные взрывоопасные вещества имеют молекулы, в которых азот в качестве отдельных атомов соединен с атомами углерода и кислорода, и их детонирующая сила обусловлена этим предпочтением атомов азота соединяться друг с другом, расщепляя твердое соединение на сильно нагретую смесь газообразного азота и окисей углерода.

Хотя атомная и молекулярная теория в настоящее время имеют полностью независимые теоретические основы, сначала их счи-

тали перазрывно связанными. Определение кратного химическому эквиваленту числа, которое можно было бы считать атомной массой, ожидало открытия методов определения молекулярной массы, в то время как этой цели можно достичь путем очень грубых оценок. Определив молекулярную массу как можно большего числа соединений данного элемента в единицах молекулярной массы водорода H_2 , взятого за 2, или кислорода O_2 , взятого за 32, в качестве атомной массы можно взять наименьшую массу элемента, представленную в молекулярных массах различных соединений, в смелой надежде и предположении, что по меньшей мере в одном из этих соединений в молекуле присутствует только один атом элемента. По существу, это предположение по-прежнему гарантировало от всяких ошибок, хотя полная определенность появилась только с открытием в конце прошлого столетия химически инертных элементов нулевой группы периодической системы.

Подлинное появление атомной теории

Первое упоминание о химических эквивалентах принадлежит немецкому химику И. Б. Рихтеру (1762—1807). Мы обязаны Рихтеру разъяснением неблагозвучного термина «стехиометрия», теперь почти вышедшему из употребления, о чем можно только сожалеть, так как это хорошее греческое слово, обозначающее «меру того, что нельзя более разделить». Его книга «Элементарные принципы стехиометрии» была опубликована в 1792—1794 гг. Для него эквиваленты значат относительные массовые пропорции, в которых соединяются основания и кислоты. Эти чисто экспериментальные исследования с несомненностью установили для названных веществ первый закон химического соединения, выражающийся в том, что химическое соединение существует в постоянных массовых пропорциях и что в двух случаях одни и те же вещества могут соединяться в двух разных пропорциях. Но отчасти из-за его туманного языка флогистика, отчасти из-за неправильности других принятых им обобщений значение вклада Рихтера поначалу не было оценено, и он не повлиял на появление химической атомной теории.

Несомненным предвестником атомной теории был знаменитый спор (в 1799—1807 гг.) между двумя французскими химиками Прустом и Бертолле относительно того, остается ли состав химического соединения в процессе образования неизменным, или же оно содержит один из элементов в избытке. Бертолле поддерживал последнюю точку зрения, но в конечном счете была доказана правота первой, которой придерживался Пруст. Пруст, так же как и Рихтер в случае кислот и оснований, обнаружил, что, когда существует более одного соединения одних и тех же двух элементов, пропорции изменяются ступенчатым образом, а не постепенно;

но он упустил закон кратных отношений. Например, он нашел, что для двух окисей олова приблизительно процентные пропорции равны 89:11 и 80:20, но не заметил, что на единицу массы кислорода приходится примерно 8 и 4 массовых единицы олова соответственно.

Дальтон и атомная теория

Принято считать, что атомная теория XIX в. была впервые выдвинута Джоном Дальтоном (1766—1844), чей портрет * приведен на рис. 5. Его теория характеризовалась и отличалась от предшествующих тем, что критерием, по которому узнавали и находили атом, была его масса; однако общепринятое представление, сохранившееся до последних лет XIX в., что она была выдвинута для объяснения закона кратных отношений, противоречит истине **. Дальтон открыл этот закон как необходимое следствие любой атомной теории. Его два знаменитых критерия, что все атомы одного элемента имеют одинаковую атомную массу и что атомы разных элементов имеют разные массы, были только правдоподобны, но, как мы теперь знаем, ошибочны. Интересно заметить, что, согласно современному состоянию науки, греки были правы, вызывая свойства вещества с формой и размером атомов, из которых оно состоит.

20 октября 1803 г. Дальтон сделал устное сообщение собранию из 9 членов литературного и философского общества Манчестера, секретарем которого он был, по статье, озаглавленной «О поглощении газов водой и другими жидкостями». В заключение он задал вопрос, почему растворимости разных газов различны, и сам ответил «почти убежденно», что они зависят от массы и числа простейших «частиц» газов, «тех, чьи частицы являются самыми легкими и одна частица будет менее поглощаема, а другие — более, поскольку они увеличиваются по массе и по сложности». Не объясняя, как он получил их, он закончил таблицей относительных масс простейших «частиц». Статья была опубликована только через два года и содержала 21 вещество — очевидно, она была дополнена именно за это время.

Подобно Лавуазье, Дальтон преимущественно интересовался физикой, а не химией, и обращался к последней только как к следствию своей работы в физике. Его первая книга была посвящена метеорологии и написана до того, как он в 1793 г. поступил в Манчестерский колледж в качестве преподавателя математики и

* Из книги «A New View of the Origin of Dalton's Atomic Theory» by H. E. Roscoe and A. Harden. Macmillan, 1896. Эта теория основывается на записях, обнаруженных в записных книжках Дальтона.

** Там же.



Рис. 5. Джон Дальтон
(1766—1844)

или «упругих жидкостей», представляют собой чрезвычайно твердые отдельные маленьки частицы, наделенные способностью к взаимному расталкиванию, причем сила расталкивания увеличивается пропорционально уменьшению расстояния между ними. На Дальтона, в соответствии с духом времени, несомненно повлияли взгляды Лавуазье, и он несколько более конкретно считал, что атомы состоят из чрезвычайно маленьких твердых ядер, окруженных несравнимо более объемной атмосферой теплорода, становящегося по мере удаления от ядра все более разреженным. Упругость газов приписывалась этим атмосферам, взаимно отталкивающимся друг от друга, так что при увеличении теплоты плотность газа уменьшалась. При таком взгляде на атомы газы представляют собой статические структуры, а не совокупность быстро движущихся молекул, диффундирующих и расширяющихся, как учат кинетическая теория газов и динамическая теория теплоты, и заполняющих все доступное пространство не вследствие их взаимного отталкивания, а из-за непрерывного движения. Те же силы, которые действуют между молекулами, являются, разумеется, силами притяжения, а не отталкивания и вызывают в конечном счете, когда уменьшается кинетическая энергия молекул, сжижение. Но Дальтон, столкнувшись с этой проблемой, неразрешимой с помощью теории атомов Ньютона, фактически уподобил структуру газов структуре штабеля пушечных ядер!

На континенте превалировал взгляд, объясняющий однородность атмосферы тем, что различные составляющие ее газы растворены друг в друге точно так же, как вода: когда она испарялась, считалось, что она растворилась в воздухе. Это, вероятно, объяс-

физики, причем метеорология оставалась его любимым предметом в течение всей жизни. Он пытался применить атомную теорию к чисто физическим свойствам газов и, кажется, был удивлен, обнаружив, что газы различаются своей растворимостью. Горячий сторонник атомов Ньютона, он настойчиво старался разрешить метеорологическую загадку, сформулированную впервые Пристли: как атмосфера, состоящая в действительности из газов различного удельного веса, может оставаться однородной без опускания кислорода вниз и без улетучивания азота вверх. Предполагалось, что атомы Ньютона, поскольку это касается газов

няет, почему Дальтон изучал растворимость различных газов в воде. Критическое изучение его первой таблицы относительных масс элементарных частиц газообразных и других тел показало, что последние два вещества, болотный газ, или метан, CH_4 и маслообразующий газ, или этилен, C_2H_4 (даются современные формулы), были добавлены в промежутки времени между прочтением и публикацией статьи. Они же, в частности, заставили предположить, что Дальтон выдвинул свою теорию, зная закон кратных отношений, тогда как, по всей видимости, он просто пользовался им как чем-то само собой разумеющимся для таких веществ, которые состоят из одних и тех же двух элементов в разных пропорциях. Он должен был сделать это для окисей серы, углерода и азота, которые имелись в первоначальной таблице, а затем он пытался скудными и неточными методами анализа их состава, существовавшими в то время, проверить, хорошо ли выполняется этот закон. В его записной книжке под датой 6 сентября 1803 г. можно найти то, что до сих пор всегда считалось первым известным набором символов для атомов пяти самых распространенных элементов, а через несколько страниц — их группировку в различные молекулы; но это, как будет видно позднее, не совсем правильно.

Трудно согласиться с тем, что Дальтону отводится преимущественное положение, ныне утверждающее его как основателя современной атомной теории, ее основателем, видимо, правильной признать Лавуазье, который установил сохранение массы при химических превращениях и доказал невесомость теплоты. А уж из этих открытий с неизбежностью следует, что атомы при образовании химических соединений должны соединяться в простых числовых отношениях. Как указывал тогда же сэр Гэмфри Дэви (1778—1829), в понимании этих вопросов Дальтона опередил Вильям Хиггинс в книге, появившейся в 1789 г. и озаглавленной «Сравнительная точка зрения на флогистонные и антифлогистонные теории». Вильям Хиггинс (1763—1825) родился в графстве Слайго, Ирландия; он был племянником доктора медицины Лейденского университета Брайона Хиггинса, более известного как физик и химик, который читал лекции по химии в Лондоне в течение последних 20 лет XVIII столетия и провел много лет за границей — в России и Вест-Индии — в качестве консультанта по проблемам химической технологии. Вильям Хиггинс поступил в Пемброукский колледж в Оксфорде, но в университет принят не был, хотя и оставил в своей книге описание тамошней химической лаборатории, в которой он потом работал. В 1791 г. он стал химиком Общества аптекарей Ирландии, а немного позднее — библиотекарем и химиком Королевского общества в Дублине, т. е. занял положение, которое актом Парламента от 1800 г. было приравнено профессуре. В 1806 г. он был выбран членом Королевского общества, но никогда не представлял себя для утверждения в этом звании. Его книга, написанная в 1789 г., является, главным образом,

отчетом о его наблюдениях и экспериментах, вследствие которых он из флогистика превратился в сторонника доктрин Лавуазье. Подобно Дальтону, он придерживался совершенно неправильных взглядов относительно диаметров тепловых атмосфер атомов Ньютона. Зато он доказал свое превосходство и приоритет перед работами Дальтона, показав, как вычислить эти диаметры, — чего не сумел сделать Дальтон. В следующей книге, «Эксперименты и наблюдения по атомной теории», вышедшей в 1814 г., он утверждал, что еще в книге 1789 г. им были установлены все постулаты, связываемые с атомной теорией Дальтона.

Работа Вильяма Хиггинса

Надо надеяться, что будущие историки атомной теории уделят больше внимания этим двум книгам Вильяма Хиггинса, которые, несомненно, подтверждают убеждение автора, что если уж была принята теория горения Лавуазье, то следующим естественным шагом должна быть современная атомная теория и что Хиггинс определенно предпринял этот шаг на 15 лет раньше Дальтона. Так, заслуживающий всяческого доверия историк Эрнст фон Мейер в своей книге «История химии», уже здесь цитировавшей, упоминает о первоначальной поддержке Дэви в 1809 г. притязаний Хиггинса на приоритет в использовании атомной теории для объяснения химических фактов и затем продолжает: «Хиггинс определенно выразил предположения, которые при поверхностном рассмотрении кажутся сходными с мнением Дальтона, утверждающего, что при образовании соединений наименьшие частицы соединяются в простых количественных отношениях. Но эти взгляды предлагались без какой-либо внутренней органической связи и, кроме того, не были подтверждены экспериментом. Для Дэви позднее стало ясно, что Хиггинс не претендовал на роль основоположника атомной теории; кроме того, он искренне признавал заслугу Дальтона».

Автор, имевший недавно случай изучить эти две книги*, не колеблясь может сказать, что это суждение совершенно неверно. Эрнст фон Мейер, вероятно, никогда не читал или даже не видел этих книг, и автор сомневается, был ли кто-либо из тех, кто в следующем веке поддерживал притязания Дальтона, а не Хиггинса, сколько-нибудь компетентен, чтобы понять (не говоря о том, чтобы делать столь категоричные заявления по этому поводу) доводы последнего, которыми он обосновывал свои заключения, хотя, очевидно, эти люди сумели в достаточной степени повлиять на сэра Гемфри Дэви, заставив его отречься от Хиггинса. Поэтому необходимо, видимо, некоторое обсуждение истинной деятельности это-

* См., например, позднюю статью Содди от 5 мая 1951 г.: F. Soddy, William Higgins and John Dalton. — «Nature», 1951, v. 167, p. 734—735. — *Прим. ред.*

го почти забытого исследователя, чтобы исправить и, возможно, аннулировать предвзятый приговор прошлого столетия.

Часть работы, проделанная Хиггинсом еще в Оксфорде, не лишена некоторого интереса, и о ней следует упомянуть в первую очередь. Химическая лаборатория там, как он описывает, была на глубине 6 футов под землей, и «стены комнаты каждые 3—4 месяца приносили новый урожай селитры». Хиггинс проанализировал ее по просьбе доктора Уолла и обнаружил, что она состоит из нитрованной связанной растительной щелочи (нитрат калия и натрия) и известковой селитры (нитрат кальция) в пропорции приблизительно 2:1. Интересно, что вначале он думал, что она появляется благодаря незначительной растительности, но затем обнаружил, что ошибся, так как она растворялась в воде, и пришел к заключению, что селитра может образовываться без помощи гнилостного вещества в неподвижном сыром воздухе, «если имеется вещество, которое притягивает ее, когда она образуется только наполовину, и тем самым доводит до кондиции», имея в виду, без сомнения, как сказали бы мы теперь, «когда происходит соединение основания с кислотой». Примерно полтора века спустя другой самобытный оксфордский химик Дж. Е. Марш (1860—1938), чья небольшая, но интересная историческая книга о происхождении химии цитировалась в главе первой, изучая разрушение камня, которому почему-то были подвержены старинные здания Оксфорда, пришел к весьма неожиданному заключению, что оно обусловлено живущими в камне мельчайшими организмами, или бактериями, и присутствием аммиака в воздухе; таким образом, он показал, что первая догадка Хиггинса была не лишена оснований.

Что касается основного назначения книги 1789 г. — опровержения теорий флогистиков, то это было относительно просто сделать после ошибочного отождествления Кирваном флогистона с водородом. Все же трудно придумать более точное опровержение, чем одно среди многих, предложенных Хиггинсом. Согласно флогистикам, когда металл растворяется в разбавленных кислотах, флогистон (водород) улетучивается из металла, а окалина (окисел) остается растворенной в кислоте. Поскольку при нагреве концентрированной серной кислоты с металлом получается двуокись серы, а не водород, и образовавшаяся соль металла остается той же, что в разбавленной кислоте, то флогистики должны были заключить, что флогистон улетучивается вместе с двуокисью серы; иначе говоря, последняя содержит водород. Тогда Хиггинс решил, что если растворять железо в сернистой кислоте или в растворе двуокиси серы в воде, то должно получиться двойное количество водорода: от разъедаемого металла и от металла, окисленного перед этим при приготовлении двуокиси серы.

В то время совершенно не было известно, как воздействует на металлы сернистая кислота, поэтому Хиггинс поставил эксперимент и к своему удивлению обнаружил, что железо растворилось, со-

всем не выделив водорода, но давая в осадок серу, а весь углерод в железе остался нерастворенным. Флогистон (энергия) первого металла, подвергнувшись воздействию концентрированной серной кислоты, наполовину сжег в ней серу, превратив ее в сернистую кислоту, а разьедаемый сернистой кислотой второй металл завершил процесс, отдав серу обратно! Нельзя было требовать от Хиггинса, чтобы он увидел процесс в истинном свете, как и того, чтобы он знал о способности водорода в момент выделения легко спонтанно восстанавливать на холоду, чего не делает обычный газообразный (молекулярный) водород. Нельзя было требовать от него и привлечения термина «пассивность» к объяснению инертности некоторых металлов на холоду по отношению к ряду концентрированных минеральных кислот. Но он показал, что сернистая кислота была превосходным растворителем железа, оставляющим нерастворенным весь содержащийся в нем углерод, в отличие от кислот, которые выделяют водород и некоторую долю углерода в виде углеводов; то же открытие спустя примерно семь лет сделали французские химики, но сетовал в своей второй книге Хиггинс, без какого-либо упоминания о том, что он обнаружил это раньше их. В результате был открыт очень изящный метод анализа стали, но хотя в настоящее время для этой цели предпочтительнее отдается таким реактивам, как серноокислая медь и амиохлорид меди, суть остается той же самой: избегать потери углерода вследствие соединения его с водородом, который получается при растворении железа во всех кислотах, кроме сернистой.

Переходя теперь к притязаниям Хиггинса на звание основоположника современной атомной теории, надо сказать, что в своей первой книге он, как уже говорилось, конечно, в большей степени занимался подтверждением взглядов Лавуазье, который рассматривал природу горения и окисления вне доктрин флогистиков, и не высказывал никаких претензий на оригинальность, используя для объяснения химических явлений атомную теорию. С точки зрения автора, в таком поведении нет ничего необыкновенного, пока речь идет об идеях как таковых, а не о вопросе приоритета, т. е. о том, кто первый ими воспользовался. Сохранение массы в химических превращениях вопреки истечению флогистона, горючего вещества, теплотворной жидкости — называйте как хотите — было неизбежным следствием некоторых химических рассуждений, некогда предложенных Лавуазье, — вот то, чего совсем не было прежде. Верно и то, что в своей второй книге, на что тоже уже указывалось, и, видимо, вплоть до самой смерти, Хиггинс неправильно расценивал действительные причины, по которым его претензии на создание новой атомной теории следует теперь считать обоснованными. Он, как и Дальтон, главным образом акцентировал внимание на том, что вряд ли заслуживает сегодня серьезного критического рассмотрения: что он первый приписал образующим соединения силам химического притяжения между атомами относительные чис-

ленные значения для объяснения многих удивительных и нуждающихся в тщательном изучении аномалий в химическом поведении вещества.

Автор, однако, будучи прежде всего химиком, а не физиком, сознается в сочувствии Хиггинсу, основанном на общности интересов, поскольку в первой его книге обнаружил точно те же головоломки, которые ставили автора в тупик сотню лет спустя. Хиггинс хотел знать, например, почему разбавленные кислоты разъедают металлы быстрее, чем концентрированные; почему комбинация, которая нелегко устанавливается между отдельными элементами, иногда возникает спонтанно между соединением двух атомов и одного из них, как между окисью азота и кислородом; почему железо не ржавеет в сухом воздухе и ржавеет во влажном и, с другой стороны, почему оно значительно легче, чем углерод, высвобождает из воды водород, в то время как именно углерод при нагревании берет кислород из окиси железа, а не наоборот. Исходя из этих фактов, Хиггинс сделал пронизательный вывод, что силы притяжения между телами лучше измерять по трудности диссоциации соединений, чем по легкости, с которой соединения образуются. Но простая основополагающая мысль, что так называемые «свободные» элементы на самом деле не свободны, а представляя собой соединения атомов одной разновидности, которые в отношении их взаимного химического сродства уже соединены так же, а иногда и лучше, чем атомы разных сортов в соединениях, была пока зародышем будущих открытий.

Но хотя позитивные попытки Хиггинса объяснить упомянутые аномалии тогда, на заре химической динамики, были обречены на неудачу, с точки зрения этого спора они вполне обосновывали его притязания считаться основоположником новой атомной теории. К примеру, в обеих книгах он представил ряд диаграмм для пяти соединений азота и кислорода, которые являются химическими формулами этих соединений, где к одному атому азота присоединяется от одного до пяти атомов кислорода. В первой книге отсутствует первая диаграмма, относящаяся к тому, что называется теперь закись азота, однако это могло случиться и при напечатании, поскольку во второй книге он приводит все пять, не изменяя поясняющего их текста. Хиггинс упоминает, однако, что, хотя о существовании первого соединения было известно к 1789 г., он в то время не принимал его во внимание в своей философии, а подробное описание этого газа, сделанное Дэви, появилось лишь в работе, опубликованной в 1800 г. В случае серного ангидрида, или SO_2 , как мы написали бы теперь, он использовал для обозначения атома серы букву S и буквами D и d (dephlogisticated air — дефлогистированный воздух) обозначил два атома кислорода, а в случае пяти окислов азота буквой P (phlogisticated air — флогистированный воздух) обозначил атом азота и буквами a, b, c, d, e — пять атомов кислорода, приписав каждой связи некоторое число, характе-

ризирующее силу, с которой два атома притягивают друг друга. Названия «азот» и «кислород» вошли в употребление, разумеется, только в следующем столетии. Так Хиггинс еще в 1789 г. обозначил атомы элементов серы, кислорода и азота начальными буквами их названий, как делается и в принятой ныне системе, введенной Берцелиусом, и Дальтон, возможно, именно потому, что знал об этом, так враждебно относился к замене собственных громоздких символов простой универсальной системой Берцелиуса.

Но даже не на этом достаточно очевидном предвосхищении современной химической формулы основываются реальные претензии Хиггинса на славу, а на поистине замечательном сочетании именно того рода рассуждений и опыта, на основании которых позже стали обучаться химии в школе каждый мальчик и каждая девочка и касающихся того, каким образом возникают молекулярные соединения газов. Можно с уверенностью сказать, что едва ли что-нибудь похожее было в других работах, относящихся к XVIII в. Хиггинс был хорошо осведомлен о тех экспериментальных факторах, на основании которых позже исследовательское прозрение снабдило атомную теорию фундаментом, касающимся относительных объемных пропорций газов при их соединении и разложении. Он, разумеется, прекрасно знал, что водород и кислород соединяются в объемном отношении 2 : 1, но, как и Дальтон в следующем столетии и в точности по тем же причинам, полагал, что вода — это соединение, включающее по одному атому от каждого из двух составляющих ее элементов, т. е. он приписывал ей формулу HO , поскольку, в отличие от окислов углерода, серы и азота, не существовало «промежуточных состояний воды».

Он знал, что сера соединяется с водородом и кислородом, образуя соответственно сероводород и двуокись серы, не изменяя объема этих газов, и для второго соединения сделал на основании этого наблюдения много правильных выводов. Из того факта, что плотность двуокиси серы примерно вдвое превышала плотность кислорода, он заключил, что это соединение содержит равные массы серы и кислорода. На основании одного только первого из этих фактов он также сделал вывод, что «молекулы» (так он писал) двуокиси серы «должны быть окружены такими же атмосферами теплоты, как молекулы кислорода, или в конечном счете, что они являются в той же степени обособленными». Для двух этих газов это было достаточно очевидным предвосхищением закона Авогадро, которому подчиняются все газы. Читатель может заметить, что то же самое относится к водороду и сероводороду, хотя Хиггинс, как это ни странно, не ссылается на это или не вполне осознает значимость своего вывода. Но есть кое-что еще более странное. На основании того же факта, что объем двуокиси серы не изменяется по сравнению с объемом вошедшего в нее кислорода, Хиггинс предположил, что, как и в случае водорода и кислорода, соединяется по одному атому каждого элемента по одному

для двуокиси серы он получил формулу SO , точно так же как формулой воды считал HO ; это при неверном аналитическом утверждении, что масса серы в серной кислоте в два раза больше массы не входящего в воду кислорода, привело его к получению для серного ангидрида формулы SO_2 . И вновь читатель может заметить в отношении двуокиси серы, что доводы в пользу придания ей формулы SO в равной степени применимы к сероводороду, который тогда разумно записать как HS . Но вместо этого Хиггинс строго и совсем в современной манере доказал, что если вода HO , а двуокись SO , то формула сероводорода будет HS_2 ! Что он был прав, легко убедиться, сравнив современные формулы воды H_2O и двуокиси серы SO_2 с формулами, предполагаемыми Хиггинсом, поскольку, если принять атомную массу кислорода за 16, истинные формулы сделают атомные массы водорода и серы равными 1 и 32, а формулы Хиггинса — 2 и 16; так что для модернизации формулы Хиггинса число атомов водорода в молекуле надо удвоить, а число атомов серы вдвое уменьшить, превратив HS_2 в SH_2 . Вероятно, стоит упомянуть, что в своей первой книге он получил отношение атомов S и H 9 : 5, которое позже в результате более точных экспериментов было исправлено на 2 : 1. Формулы HS_2 Хиггинс придерживается в своей следующей книге, а Дальтона он упрекает за получение сначала отношения SH_3 , а затем изменения его на SH , «таким образом, из одной ошибки впадая в другую».

Все три формулы были, разумеется, неправильны. Дальтон двумя своими выстрелами взял мишень в вилку, но Хиггинс был от нее еще дальше, получив перевернутое отношение. Тем не менее автор желал бы еще найти в какой-либо работе Дальтона что-нибудь, хотя бы на «грамм» столь же интересное, как рассуждение, посредством которого Хиггинс, если учесть неправильные начальные посылки (формулы воды и двуокиси серы), получил совершенно верный результат. Хиггинс взрывал смесь равных объемов сероводорода и кислорода, что вызывало обильное осаждение серы, количество которой он правильно оценил как половину всей серы сероводорода. Он обнаружил, что объем газа вследствие этого уменьшался до одной четверти своего прежнего значения и был занят практически чистой двуокисью серы; он доказал это как поглощением газа в растворе нитрата бария, который не давал осадка сульфата бария, так и соединением его с равным объемом сероводорода, в результате чего объем уменьшался наполовину с выпадением в осадок серы. Он знал, поскольку объем сероводорода есть собственный объем водорода, что половина кислорода шла на окисление водорода до воды и, поскольку объем двуокиси серы равен собственному объему кислорода, что другая половина шла на образование наличествующей двуокиси серы. Если привести объем водорода в сероводороде к одному атому водорода, то половина объема кислорода, соединяющегося с ним (по формуле воды Хиггинса), есть один атом, так же как и половина объема,

израсходованного на окисление половины серы, которая составляет, соединяясь с одним атомом кислорода (по формуле двуокиси серы Хиггинса), один атом серы. Так как окисляется только половина серы, а половина выпадает в осадок как чистый элемент, то объем сероводорода, приведенный к одному атому водорода, содержит два атома серы. Эта аргументация не включает никаких предположений и даже тех, которые использовал Авогадро.

Слабейшим пунктом рассуждения или, точнее, дефектом его записи является оценка Хиггинса, что половина серы выпадает в осадок. Это абсолютно правильно, но в какой степени Хиггинс вывел это из известных данных, касающихся плотности сероводорода, и в какой степени это было простой догадкой, основанной на видимом количестве выпадающей серы, или для достижения правильного результата он проводил другие эксперименты, в которых варьировал пропорцию кислорода, — невозможно ответить, исходя из его собственного описания, строго говоря туманного и недостаточного. Но с общих позиций надо признать, что это было, несмотря ни на что, впечатляющим первым усилием пролить свет на молекулярный состав газов вообще и сероводорода в частности. То что в остальные годы своей жизни Хиггинс не продвигался дальше по этому пути, вероятно, можно объяснить как раз тем уже упоминавшимся обстоятельством, что, до тех пор пока Дальтон не удостоился чести считаться «родоначальником» современной атомной теории, Хиггинс не находил ничего особенно замечательного в использовании атомной теории для объяснения химических превращений. Он был химиком с оригинальными физическими идеями, в то время как Дальтон был физиком, не имеющим таковых, и позиция химиков в начале прошлого века по отношению к его работе была во многом аналогична той, которую они заняли в начале нынешнего столетия в отношении атомного распада и концепции изотопов.

В биографии Хиггинса, имеющейся в английском «Словаре национальной биографии», отмечается, что он был первый, кто ясно сформулировал в своей книге, вышедшей в 1789 г., закон кратных отношений, но затем его биограф заявляет, что в книге 1814 г. он «совершал недостойные нападки на Дальтона». Но пусть лучше скажет за себя сам Хиггинс, ибо его заключительные слова и сейчас, через многие годы, дышат красноречием несправедливо обиженного, взывающего к правосудию, хотя даже более вечное их звучание — в разочаровании старости, сожалеющей о незрелом рыцарстве молодости.

«Плодотворные годы химической науки кончились. В дни моей юности фортуна улыбнулась мне... я знался со многими почтенными отцами нашей нынешней системы. В тот благоприятный период конечной и ревностно преследуемой целью исследования была истина, а не достижение личного престижа. Философы тогда ставили своей задачей приписать заслугу открытия его законному владель-

цу, а не приписывали его самим себе или кому-то другому. И вот теперь, когда жизнь моя клонится к закату, я сам вынужден защищать труды моей молодости от притязаний тех, кто бесцеремонно их присвоил и кто, объединив усилия, пытается даже отнять их у меня...»

На фоне всех прочих шагов, оказавшихся необходимыми па пути к созданию атомной теории, так же как и ее двойника—молекулярной теории, вклад Дальтона выглядит теперь наименьшим. В теоретическом обосновании закона кратных отношений и в отыскании подтверждений ему с помощью химического анализа его опередил Хиггинс. Притязания же Дальтона считаются единственным творцом современной атомной теории базируются на его «Новой системе», привлекая всеобщее внимание современников, поскольку она показывала, каким образом, если принимать в расчет массы атомов в связи с их химической природой, становилось возможным заменить туманные спекуляции, до того господствовавшие в отношении атомов, вполне определенным подходом, который, будучи положен в основу некоторой экспериментальной проверки, позволял надеяться, что со временем можно будет приписать всевозможным элементам какие-то относительные атомные массы. Если бы это произошло, то было бы несущественно, что найденные так атомные массы оказались бы не истинными, а усредненными атомными массами, потому что и эти средние значения были бы сами по себе константами природы. Задолго до рождения концепции изотопов специальные опыты показали, что атомная масса элемента остается одной и той же, из какого бы естественного источника его ни получали, или, как мы выразились бы теперь, изотопный состав элементов в природе инвариантен.

Как догадались современники Дальтона, его так называемые атомные массы были просто произвольно переименованными химическими соединительными пропорциями, или эквивалентами. Его «закон наибольшей простоты» был не более чем реликвия претенциозной логики схоластов, которую за два века до этого довел до абсурда в своем «Новом органоне» Фрэнсис Бекон, сделавший постулат первопричинной. Так, вода по Дальтону была HO , а аммиак NH , потому что это были простейшие формулы, которые оказались неправильными, а два окисла углерода были CO и CO_2 , что оказалось верно. Его рассуждения по данному предмету настолько неудачны, что сегодня их почти невозможно читать. Главным образом они касались, раз уж мы различаем их теперь, молекулярной, а не атомной теории, и точнее, чисто спекулятивной и полностью ошибочной теории статического внутреннего состава газов, которую он пытался построить.

В начале одной из записных книжек Дальтона имеется очень интересная запись, датированная примерно шестью неделями раньше его первого устного сообщения теории в 1803 г., из нее следует, что с самого начала он столкнулся с трудностью, которую

так никогда и не смог преодолеть и которая до сих пор остается *popus asinorum** для начинающих. Дальтон видел, что, хотя относительные плотности (массы на единицу объема) различных газов, вероятно, как-то связаны с относительными массами своих первичных частиц, они не могли быть тем же самым, потому что водяной пар, например, легче кислорода, а простейшая частица пара, содержащая как водород, так и кислород, должна весить больше, чем первичная частица кислорода. Это привело его к заключению о необоснованности «недоразумения», как он назвал позднее идею, что одинаковые объемы разных газов содержат одинаковое количество простейших частиц, и этого убеждения он придерживался вплоть до самой смерти в 1844 г. Он считал, что количества должны быть разными, для того чтобы можно было объяснить однородность атмосферы.

С другой стороны, рассматривая закон парциальных давлений, носящий его имя, который в действительности гласит, что газ, являющийся составной частью смеси, растворяется в жидкости, как если бы он один, в отсутствие остальных газов смеси, занимал все пространство, можно сказать, что Дальтон внес в утверждение современного мировоззрения не только экспериментальный вклад, состоящий в том, что молекулы газов пребывают в непрерывном, свободном и независимом движении, но и интересную новую и плодотворную идею.

Последующие этапы разработки молекулярной и атомной теорий на протяжении XIX в. нуждаются лишь в кратком обзоре. Что действительно заслуживает внимания, если оглянуться назад, так это, как показали дальнейшие события, огромное практическое значение появившейся наконец возможности определенно ответить на такой, к примеру, вопрос, какую формулу имеет вода: HO или H_2O . Сто лет назад даже химикам такие вопросы представлялись лишь академическими, и тем более нельзя представить себе философа, который мог хотя бы приблизительно догадываться, что ключ к расшифровке материальной вселенной лежит именно в разрешении этой проблемы и что до тех пор, пока она не будет решена, никакого реального прогресса в этом самом фундаментальном, как и самом древнем, разделе науки нельзя и ожидать.

Молекулярная теория

Истинными основоположниками современной молекулярной теории стали Гей-Люссак в 1808 г. и три года спустя Авогадро; первый — после открытия закона объемных отношений, второй — после его правильного объяснения при помощи своей знаменитой гипотезы, ныне переведенной в ранг закона. Гей-Люссак обнару-

* Задачей для ослов (лат.). — *Прим. ред.*

жил, что объемы химически смешивающихся газов всегда относятся друг к другу и к объему смеси, если она газообразна, как целые числа. Так, при температуре выше 100°C два объема водорода соединяются с одним объемом кислорода, в результате чего получаются два объема водяного пара. Авогадро утверждал, что все газы при одинаковых температуре и давлении содержат в единице объема одно и то же количество молекул. Оба закона носят лишь приблизительный характер, поскольку реальные газы отклоняются от газовых законов все больше и больше по мере повышения давления и понижения температуры, т. е. отклонения становятся тем значительнее, чем ближе эти параметры приближаются к условиям сжижения газа.

Совместно два закона показывают, что две молекулы водорода объединяются с одной молекулой кислорода, давая две молекулы водяного пара, так что в этом процессе молекула кислорода должна подразделяться на две равные части, каждая из которых входит в одну из двух молекул образовавшегося пара. Кислород плотнее пара, но не в два раза, поэтому возражение, возникавшее у Дальтона на основании первого утверждения против того, что равные объемы газов содержат одинаковое количество элементарных частиц, исчезает, если молекулы и водорода, и кислорода состоят из двух атомов, а молекула пара — из двух атомов водорода и одного кислорода. Но то ли потому, что оно не было осмыслено, то ли из-за господствовавшего скептического отношения к теоретическим обобщениям это простое соображение осталось сначала почти незамеченным, а затем было забыто почти на полвека, если не считать одного исключения.

Атомная теория Берцелиуса

Эрнст фон Мейер, хотя традиционно и приписывал основание атомной теории Дальтону, ясно показал, что Берцелиус, развивая работу Рихтера по химическим эквивалентам и исследования Дэви, пришел к этой теории независимо от ознакомления с вкладом Дальтона. В более узком смысле, возможном сегодня, когда мы делаем различие между атомной и молекулярной теориями, именно Берцелиуса нужно считать основоположником современной атомной теории.

Великий пионер точного химического анализа швед Берцелиус (1779—1848), применяя молекулярную теорию, исправил дальтоновское отношение масс кислорода и водорода с 8 на 16 и попытался, таким образом, преобразовать значения химических эквивалентов элементов, образующих летучие соединения, чтобы они стали их атомными массами. Но пока речь идет о таких элементах, то именно ему, а не Дальтону следует приписать черную таблицу истинных атомных масс. С другой стороны, Берцелиус непрости-

тельно опоздал с признанием обоснованности еще большего и величайшего по значению обобщения, включающего в рамки нашего знания большинство остальных элементов. В его первой таблице, опубликованной в 1818 г., значения атомных масс металлов были в два или четыре раза больше правильных, главным образом из-за того забавного обстоятельства, что в то время не любили таких соотношений, как 2 : 3, 2 : 5 и 3 : 4, между числами атомов металла и кислорода в металлических окислах.

Годом позже, в 1819 г., были сделаны еще два обобщения, первое из которых принадлежало Дюлонгу и Пти и состояло в том, что атомная теплоемкость (удельная теплоемкость \times атомная масса) большинства элементов примерно одинакова и равна 6.

Второе обобщение, сделанное Митчерлихом и известное как *закон изоморфизма*, утверждает, что молекулы солей, обладающих одинаковой кристаллической формой, имеют похожее строение. Изоморфизм доказывается возможностью образования смешанных кристаллов, в которых может без конца варьироваться соотношение между двумя совместно кристаллизующимися солями без изменения кристаллической формы. С тех пор метод изоморфизма с помощью микроскопа был распространен и на собственно металлы, в случае которых смешанные кристаллы называются *эвтектикой*, и именно в этой области, металлографии, он оказался наиболее полезным. Самый исчерпывающий пример в химии — квасцы. Это соли с общей формулой $X_2(ZO_4) \cdot Y_2ZO_4 \cdot 24H_2O$, где X может быть алюминием, железом, хромом или другим трехвалентным элементом, Y — натрием, калием или другим одновалентным элементом и Z — двухвалентным элементом, например серой, селеном или теллуром. Закон Митчерлиха дает возможность, если известна атомная масса одного из трех элементов X, Y и Z, назвать атомные массы остальных.

Этот закон широко использовался Берцелиусом в качестве руководящего принципа при переработке позднейших таблиц атомных масс, однако первое и более простое обобщение, касавшееся атомной теплоемкости, несмотря на то, что оно оказалось гораздо более полезным в этой области, не так быстро завоевало доверие. Проблеме отношения эквивалента к атомной массе оно сводило к определению удельной теплоемкости элемента; Нейман в 1831 г. распространил этот закон и на простые химические соединения. Встречались, однако, некоторые исключения, объяснение которых стало важной вехой на пути создания квантовой теории. Но эти исключения касаются в основном неметаллов с низкой атомной массой, газообразные соединения которых, подчиняющиеся закону Авогадро, существуют в избытке. Ценность закона Дюлонга и Пти в том, что он дополняет последний, и совместно они дают правильные атомные массы для металлов.

Итак, еще до окончания второго десятилетия прошлого века существовали методы для установления атомных масс прак-

тически всех известных элементов, хотя к середине века химики по большей части перестали ими пользоваться, предпочитая описывать химические соединения на языке чисто экспериментальных соединительных отношений, или эквивалентов. Воскресило химическую теорию атома развитие органической химии и следующая из нее концепция молекулы как структуры, согласно которой принципиально важны не только абсолютные и относительные количества атомов, но и их взаимное расположение внутри молекулы, или *связи*.

В 1858 г. соотечественник Авогадро итальянский химик Каниццаро опубликовал книгу, систематизирующую все методы определения атомных масс и применимость каждого из них, которая избавила атомную теорию от дальнейших сомнений. С тех пор дело было уже за определением молекулярных масс нелетучих органических соединений, что было неизбежным первым шагом к познанию структуры молекулы и что опять-таки необходимо было точно знать, прежде чем искусственно строить, или синтезировать, вещество. Именно в этой области стала постепенно развиваться теория валентности. Атому каждого элемента приписывалось некоторое определенное число (или числа) единиц соединительной способности, от одного до восьми (в редких крайних случаях), которые изображались соединительными связями, удерживающими вместе атомы в молекуле. Но многие элементы проявляют в разных своих соединениях разные валентности. Необозримое поле для изучения молекулярной архитектуры представляли органические соединения, состоящие по большей части из углерода, водорода и кислорода, валентности которых соответственно 4, 1 и 2 неизменны или почти неизменны, и азота с валентностью 3 или 5. Это, в свою очередь, очень помогло подведению под атомную теорию крепкого фундамента и в неорганической химии, хотя, что довольно любопытно, существующие идеи валентности, так успешно служившие в случае органических соединений, в этой области не работали, и отчаянные усилия заставить их это делать выглядят теперь как старания натянуть правый башмак на левую ногу. Однако гораздо более фундаментальным достижением, касающимся природы элементов и ставшим вепцом атомной теории постольку, поскольку ею были установлены атомные массы достаточного количества элементов, был периодический закон.

Но в интересах исторической справедливости и чтобы показать, насколько каверзными иногда бывают подвохи судьбы, следует кратко упомянуть замечательное обобщение, сделанное одним эдинбургским медиком в 1815 г. и известное как *закон Дюроуэра Праута*, которая была одним из первых плодов Daltonовской атомной теории. Во всем мире историки химии предели ее значение как один из главных факторов, препятствующих принятию теории и запутывающих потомков, хотя в действительности она была вдохновляющим стимулом, побуждавшим химиков как можно точнее

определять атомные массы, несмотря на скучный и утомительный характер этой работы. Исходя в первую очередь из почти точно целочисленного отношения атомных масс кислорода и водорода, Праут высказал предположение, что все атомные массы кратны атомной массе водорода и что последний и есть тот протил древних, из которого построено вещество.

После того, как вслед за Берцелиусом работы Дюма, Мариньяка и особенно работа Стаса (ставшая кульминационной в 1840 г.) давали все более и более точные результаты измерения атомных масс, было окончательно установлено, что атомная масса водорода (равная 1,008, если атомная масса кислорода 16) больше единицы примерно на 1%. Берцелиус предпочел кислород водороду в качестве шкалы атомных масс по чисто практическим соображениям: во-первых, поскольку последний является самым легким элементом, точно определить его атомную массу особенно трудно, а во-вторых, большинство элементов дает соединения с кислородом, доступные точному анализу, тогда как с водородом таких соединений очень немного. В таком подходе, когда атомной массе кислорода приписывается число 16, аналитики нашли потом дополнительное преимущество, состоящее в том, что, хотя водороду и не соответствовала единица, большое количество атомных масс оказалось настолько близко к целым числам, что в обиходе, не рискуя очень ошибиться, вполне можно было пользоваться их целочисленными значениями. Случайностью это быть не могло, поэтому гипотеза Праута возродилась в новом свете. Так продолжалось до тех событий, о которых мы расскажем, когда придет время говорить об изотопах.

На этом месте нам стоит прервать историческое повествование, чтобы, насколько это возможно, лаконично и точно рассказать о периодическом законе, каким он видится нам теперь, обращаясь к его фактическому, более позднему, чем хронологическое, появлению; ибо даже сейчас он представляется достаточно сложной взаимосвязью, и важно, чтобы, перед тем как продолжить рассказ, в уме читателя сложилась правильная картина.

Периодическая система химических элементов

Расположение химических элементов в порядке возрастания их атомных масс обрело смысл периодического закона, когда обнаружилось, что после определенного количества элементов, именуемого *период*, следующий период состоял из элементов, которые в химическом отношении были очень сходны с элементами предыдущего. В начале таблицы в периоде было семь элементов, затем в результате дальнейших исследований это число выросло до восьми; но после первых двух периодов следующие два содержат каждый на десять больше, т. е. по 18; в следующем периоде добавляется

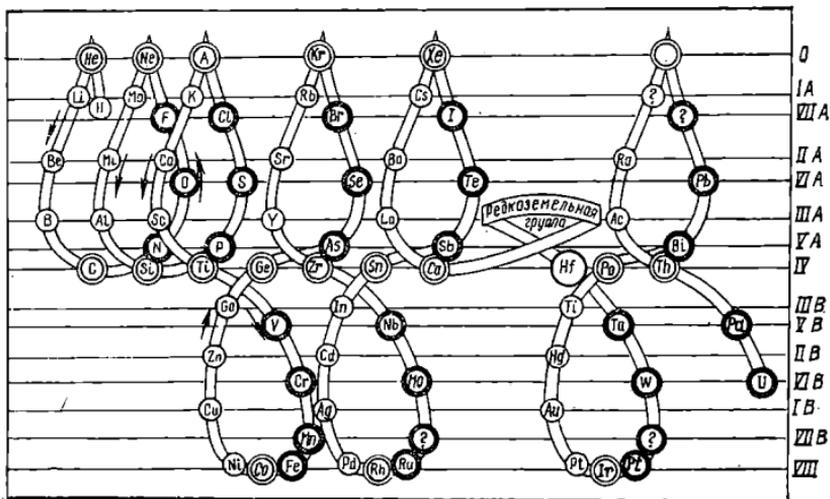


Рис. 6. Спиральное представление периодического закона

еще 14 элементов, т. е. получается 32, а завершается таблица неполным периодом из семи элементов. Таким образом, хотя в начале таблицы связь между элементами последовательных периодов достаточно проста, в дальнейшем она становится все более сложной. Чтобы эта взаимосвязь наглядно обозначалась, в общепринятой двумерной таблице периоды располагают горизонтально, каждый последующий ниже предыдущего, так что элементы в вертикальных колонках оказываются химически подобными, или *гомологами*, и образуют набор так называемых *семейств родственных элементов*. Однако с увеличением количества элементов в периодах появляются трудности, которые не могут быть устранены в рамках двухмерного представления, и необходима какая-то трехмерная диаграмма. Она и была впервые предложена сэром Вильямом Круксом, который расположил элементы в спиральной диаграмме-восьмерке и рассматривал закон как проявление постепенной эволюции вещества, начиная от протила. Две эти формы не альтернативны, они скорее дополняют друг друга, каждая выявляя специфические моменты этой сложной взаимосвязи.

Схема периодического закона приведена в табл. 1 и на рис. 6 (датирован авторский вариант). Стоит можно отметить, что любой способ записи периодического закона сведется по сути дела к непрерывной последовательности, начинающейся номером 1 (водородом) и заканчивающейся номером 92 (ураном), который завер-

Периодическая система

	Водород 1 Н 1,0080	ГРУППА 0	ГРУППА I	ГРУППА II
Первый короткий период (8)		Гелий 2 He 4,003	Литий 3 Li 6,940	Бериллий 4 Be 9,02
Второй короткий период (8)		Неон 10 Ne 20,18	Натрий 11 Na 23,00	Магний 12 Mg 24,32
Первый длинный период (18)		Аргон 18 Ar 39,944	Калий 19 K 39,096	Кальций 20 Ca 40,08

ГРУППА VIII

↓	↓	↓		
Железо 26 Fe 55,85	Кобальт 27 Co 58,94	Никель 28 Ni 58,69	Медь 29 Cu 63,54	Цинк 30 Zn 65,38

Второй длинный период (18)	Криптон 36 Kr 83,7	Рубидий 37 Rb 85,48	Стронций 38 Sr 87,63
----------------------------	-----------------------	------------------------	-------------------------

Рутений 44 Ru 101,7	Родий 45 Rh 102,91	Палладий 46 Pd 106,7	Серебро 47 Ag 107,880	Кадмий 48 Cd 112,41
------------------------	-----------------------	-------------------------	--------------------------	------------------------

Самый длинный период (32)	Ксенон 54 Xe 131,3	Цезий 55 Cs 132,01	Барий 56 Ba 137,36
---------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Осмий 76 Os 190,2	Иридий 77 Ir 193,1	Платина 78 Pt 195,23	Золото 79 Au 197,2	Ртуть 80 Hg 200,61
----------------------	-----------------------	-------------------------	-----------------------	-----------------------

Последний неполный период (7)	Радон 86 Rn 222	— 87	Радий 88 Ra 226,05
-------------------------------	--------------------	---------	-----------------------

Редкоземельные элементы (15) (вынесены из таблицы)	Лантан 57 La 136,92	Церий 58 Ce 140,13	Празеодим 59 Pr 140,92
	Тербий -65 Tb 159,2	Диспрозий 66 Dy 162,46	Гольмий 67 Ho 164,94

ГРУППА III	ГРУППА IV	ГРУППА V	ГРУППА VI	ГРУППА VII
Бор 5 В 10,82	Углерод 6 С 12,010	Азот 7 N 14,008	Кислород 8 O 16,000	Фтор 9 F 19,00
Алюминий 13 Al 26,97	Кремний 14 Si 28,06	Фосфор 15 P 30,98	Сера 16 S 32,066	Хлор 17 Cl 35,457

Скандий 21 Sc 45,10	Титан 22 Ti 47,90	Ванадий 23 V 50,95	Хром 24 Cr 52,01	Марганец 25 Mn 54,93
------------------------	----------------------	-----------------------	---------------------	-------------------------

A

Галлий 31 Ga 69,72	Германий 32 Ge 72,60	Мышьяк 33 As 74,91	Селен 34 Se 78,96	Бром 35 Br 79,916
-----------------------	-------------------------	-----------------------	----------------------	----------------------

B

Иттрий 39 Y 88,92	Цирконий 40 Zr 91,22	Ниобий 41 Nb 92,91	Молибден 42 Mo 95,95	— 43
----------------------	-------------------------	-----------------------	-------------------------	---------

A

Индий 49 In 114,76	Олово 50 Sn 118,70	Сурьма 51 Sb 121,76	Теллур 52 Te 127,61	Иод 53 I 126,92
-----------------------	-----------------------	------------------------	------------------------	--------------------

B

Редкозем. 57—71	Гафний 72 Hf 178,6	Тантал 73 Ta 180,88	Вольфрам 74 W 183,92	Рений 75 Re 186,31
--------------------	-----------------------	------------------------	-------------------------	-----------------------

A

Таллий 81 Tl 204,39	Свинец 82 Pb 207,21	Висмут 83 Bi 209,00	Полоний 84 Po 210	— 85
------------------------	------------------------	------------------------	----------------------	---------

B

Актиний 89 Ac 227	Торий 90 Th 232,12	Протактиний 91 Pa 231	Уран 92 U 238,07	
----------------------	-----------------------	--------------------------	---------------------	--

Неодим 60 Nd 144,27	— 61	Самарий 62 Sm 150,43	Европий 63 Eu 150,0	Гадолиний 64 Gd 156,9
Эрбий 68 Er 167,2	Тулий 69 Tm 169,4	Иттербий 70 Yb 173,04	Лютеций 71 Lu 175,0	

шает естественный ряд элементов. В случае плоской таблицы каждая новая строка элементов начинается слева, а заканчивается справа. Приведенный здесь вариант наилучшим образом выявляет отношения химического родства. Водород, занимающий первое место, вынесен из таблицы и, будучи одновалентным, родствен элементом группы I и группы VII, хотя, в силу своей электроположительности, в большей степени родствен первым. Хотя периодический закон был открыт после расположения элементов в порядке возрастания их атомной массы, к концу прошлого века выяснилось, что имеются и исключения, когда в некоторых парах элементы неправильно переставлены местами. Теперь известно, что периодический закон отражает не зависимость между химическими свойствами элемента и его атомной массой, которая, как правило, является просто статистической средней по нескольким разным целочисленным атомным массам, а зависимость химических свойств от количества электронов в атоме, которое возрастает на единицу при переходе от элемента к элементу. Периодичность химических свойств обусловлена химически активными электронами в атоме, количество которых периодически возвращается к нулю, чему соответствует семейство инертных газов атмосферы, открытых на исходе прошлого века. Номера групп в системе от 0 до VIII означают максимально возможное число активных электронов в атоме. Но принятая первоначально взаимосвязь между химическими свойствами и увеличивающейся атомной массой, несмотря на свою принципиальную неправильность, в качестве некоторой усредненной взаимосвязи до сих пор широко и успешно используется на практике.

Таким образом, за несколькими исключениями, о которых речь впереди, элементы, начиная с № 2 (первого элемента группы 0 — гелия), разбиты на восемь групп или семейств, из которых первая группа состоит из сильно основных, или образующих основания щелочных металлов. Эти металлы электроположительны: их ионы устремляются к отрицательному электроду при электролитическом разложении их солей, т. е. при прохождении через последние электрического тока. Другая крайность — группа VII, содержащая сильно кислотные, или кислотообразующие, электроотрицательные элементы — галогены. При переходе от группы к группе основной характер постепенно ослабевает, хотя группа II состоит еще из очень сильно основных щелочноземельных элементов, основные свойства которых лишь едва слабее, чем у щелочных элементов группы I. В середине таблицы, в группе IV, чему в первом периоде соответствует углерод, достигается электронейтральность, а затем, к группе VII, семейства становятся все более кислотными.

Максимальная валентность элемента равна его групповому номеру, когда он выступает в качестве электроположительного, или основного, элемента, и восьми минус номер группы, когда он выступает как электроотрицательный элемент — это обобщение назы-

вается *правилом Абегга*. Можно сказать, что резко контрастирующий характер групп, соответствующих началам и концам последовательных периодов, делает химию этих элементов, как правило, намного проще и определенной, чем химия элементов середины системы; особенно это относится к более тяжелым элементам, химия которых иногда оказывается очень плохо предсказуемой. На современном языке соединения первых обычно бывают *полярными*, а вторых — часто *неполярными*, и то что мы знаем теперь об этом более наглядном различии между ними, значительно упростило химию элементов середины периодической системы. Для тяжелых элементов середины таблицы при спуске вниз по столбцу особенно заметно усиление основного характера с увеличением атомной массы. Также следует сказать, что, хотя элементы первого короткого периода Д. И. Менделеев назвал и до сих пор они известны как *типические элементы*, они обычно менее типичны для химии своих семейств, чем элементы второго периода.

Что касается трудностей, связанных с увеличением числа элементов в следующих периодах, то последние удобнее рассматривать как получающиеся в результате вставки в первоначальный период, между группами II и III, последовательности из десяти элементов (все — металлы), как это показано на схеме (табл. 1) изломом горизонтальных линий. После первых двух коротких периодов, которые содержат по два первых члена восьми групп, или семейств, идут два длинных периода по 18 элементов каждый. Из десятка вставленных элементов первые пять и последние два попадают соответственно в группы III—VI и I—II, оставляя под элементами группы 0 так называемую группу VIII, которая содержит последовательности трех очень похожих металлов. Поэтому если дело касается группы 0, то после третьего ее элемента — аргона аналоги идут не один за другим, а встречаются через один член в столбце, причем родство здесь двойственное: между инертными газами с одной стороны и между элементами группы VIII — с другой. Но там, где начинаются и кончаются вставные декады, т. е. соответственно в группах III и II, хотя и для них справедливо сказанное выше, имеется значительное химическое подобие между последовательными членами столбцов, которое постепенно ослабляется в других группах с приближением к группе VIII с любой стороны. Во многом благодаря этому правилу Абегга, хотя и не столь безоговорочно, применимо также для вставных членов, обеспечивая принадлежность соединений элементов одного и того же столбца к одному общему типу. Исторически так сложилось, что длинные периоды были подразделены на два подпериода: А — для первых восьми и В — для последних семи элементов, а три промежуточных элемента относились к группе VIII (все это показано на схеме).

В следующий самый длинный период вставлены еще 14 элементов, именуемых редкоземельными элементами, все они трехва-

ленты и крайне похожи на первый, принадлежащий к группе III. Лантан и остальные элементы (всего 15) для удобства и компактности вынесены из таблицы и показаны отдельно внизу. В последнем неполном периоде, включающем семь членов, события пока развиваются, как в двух длинных периодах, а не как в самом длинном, непосредственно ему предшествующем. Это следует запомнить на будущее, чтобы заметить новые черты в проявлении периодичности, которые теперь интересным образом обнаружались и которые мы обсудим позже, когда будем говорить о новых, трансуранных элементах.

Спиральная форма периодического закона

Что касается спиральной формы (см. рис. 6), то она является попыткой схематического представления обсуждаемых выше моментов. Электроположительные элементы, обозначенные одинарными кружками, расположены как бы над плоскостью листа, а электроотрицательные (жирные кружки) — как бы под плоскостью листа; интерполированные элементы представлены нижними половинами трех соседних восьмеричных витков (те, что лежат в плоскости листа, обозначены двойными кружками), а интерполированные редкоземельные элементы показаны в виде петли.

Заостренные верхушки верхних участков «восьмерок» и почти плоские основания нижних частей демонстрируют резкое изменение химических свойств при переходе от электроотрицательных к электроположительным элементам с любой стороны через химически инертные элементы, чему противопоставляется необычайная схожесть свойств трех соседних элементов группы VIII. Однако эта спиральная форма неудачна для сколько-нибудь достаточного выявления аналогий между подгруппами А и В и ее следует считать только схемой, не имеющей количественного значения.

Говоря о том, что теперь собой представляет периодический закон, нужно коротко рассказать, как он был впервые установлен и какое влияние оказал на утверждение современной атомной теории. Первым его открыл англичанин Дж. А. Р. Ньюлендс в 1864 г., который назвал его законом октав. Он говорил: «Восьмой элемент, считая с данного, в некотором роде повторяет первый, подобно восьмой ноте октавы в музыке». Несмотря на изменение периода с семи на восемь, имя Ньюлендса счастливо напоминает словом «октет», которое в современной химической теории так называемого кубического атома применяется для обозначения восьми электронов в углах куба, используемого для схематического представления атома, входящего в состав молекулы. В том же году подобную попытку предпринял Лотар Мейер в Германии, который вместе с русским ученым Д. И. Менделеевым в огромной степени расширил и развил обобщение. Д. И. Менделеев же был

первым, кто пытался объединить все элементы в единую классификацию, и именно ему мы, главным образом, обязаны ее нынешним видом. Что может существовать какая-то связь между атомной массой и химическими свойствами поначалу без сомнения было весьма удивительно для химиков-скептиков. Но трудно простить и стыдно вспомнить, что эту мысль сочли пригодной для осмеяния, а первооткрывателю этого мощного рычага прогресса был закрыт доступ в регулярные научные журналы того времени. К сожалению, усложнение и возрастающая специализация науки, так же как и перерождение университетов из храмов философии в учебные заведения для подготовки нового узкопрофессионального типа исследователей с шорами на глазах, скорее только способствовали этому нетерпимому фарисейскому отношению.

Д. И. Менделеев, пытавшийся охватить все элементы, вынужден был заключить, что некоторые места пока пусты, и, в частности, он предсказал существование трех новых элементов, указав, исходя из положения в таблице и свойств элементов, соседствующих с ними в периодах и группах, их химические свойства, достаточные для того, чтобы позволить при целенаправленном поиске сразу же обнаружить их. Эти элементы Д. И. Менделеев назвал экабор, экаалюминий и экасилиций, добавляя приставку «эка» к названиям более легких гомологов, а теперь это скандий (1879), галлий (1875) и германий (1886). Незадолго до этого спектральный анализ обогатил периодическую систему четырьмя новыми элементами: цезием (1860), рубидием и таллием (1861) и индием (1863).

Еще более важный результат состоял в том, что периодический закон стал последней апелляционной инстанцией, выносящей окончательный приговор в таких сомнительных случаях, как соотношение между химическим эквивалентом и атомной массой, и раз уже был сформулирован общий принцип периодической системы, то не могло оставаться какой-то неисправленной ошибки. Так, первоначально бериллий считался трехвалентным с атомной массой 13,5, а индий — двухвалентным с атомной массой 75,2; в отношении же валентностей оказалось наоборот, а атомные массы равны 9 и 112,8 соответственно. Урану сначала приписывали атомную массу 60, затем изменили ее на 120, однако периодический закон показал, что истинное значение ее равно 240 — это последнее значение выражено через атомную массу водорода, принятую за единицу. Последнее, но не наименьшее. Только после открытия невалентных инертных газов появилась уверенность, что молекулы обыкновенных газов состоят из двух, а не из числа, кратного двум, атомов. Первые же по самой своей природе должны быть одноатомными, так что для этих газов атом и молекула означают совершенно одно и то же.

В конце прошлого века главными белыми пятнами оставались, во-первых, элементы конца таблицы между висмутом (№ 83) и торием (№ 90), только два из них, входящие в последний период,

были известны. Это область радиоактивности, заполненная примерно 40 радиоэлементами, которые привели к открытию изотопов. Во-вторых, теория ничего не могла сказать в отношении количества редкоземельных элементов, и, в-третьих, не было никакой уверенности, что места, оставленные незанятыми для двух гомологов марганца, действительно имеются в таблице. Периодическая система стала в конце прошлого века памятником подвигу абсолютно непреклонного упорства и аккуратности в экспериментальной работе, тем более значительным, что пока не существовало даже намека в отношении ее смысла, и с точки зрения теоретиков она выглядела самой настоящей криптограммой, своими буквами призывающей расшифровать ее.

Глава третья. ЭНЕРГИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

До середины прошлого столетия тепло рассматривалось главным образом как особый невесомый флюид — теплород. Считалось, что теплород способен проникать между первичными частицами материи, способствуя самоотталкиванию их и вызывая таким образом расширение и переход вещества из твердого или жидкого состояния в газообразное. Такая точка зрения несколько отличалась от представлений о постоянной атмосфере теплорода, которой, по мнению Лавуазье, Хиггинса и некоторых других ученых, окружены твердые ядра ньютоновского атома. Несомненно и то, что появление этой точки зрения было во многом вызвано необходимостью постулировать сходный электрический флюид для объяснения электропроводности, что приобрело особую актуальность после публикации работ Стефана Грея (1695—1736), и особенно после открытия гальванического электричества в конце XVIII в. и гальванической батареи — предшественницы современной электрической батареи.

В период так называемого «великого пересмотра» химических терминов, который был начат Лавуазье и его соотечественниками после ниспровержения теории флогистона и которому мы обязаны появлением химической номенклатуры почти в ее современном виде, термин «теплород» был сохранен для определения «исключительно упругого флюида», называвшегося прежде «огненным». Вопреки общепринятому мнению, по вопросу о природе окисления Лавуазье придерживался взглядов, почти идентичных взглядам сторонников флогистонной теории, разве что его подход был более четким и цельным. Он считал, что газ состоит из неизменяемой основы и теплорода; горючие вещества и металлы сильнее притягиваются к кислородной основе, чем к теплороду, и, таким образом, в процессе окисления выталкивают его.

Зачатки современного представления о тепле как о «виде движения» можно найти уже в известной работе Фрэнсиса Бэкона (1561—1626) «Новый Органон». Согласно выдвинутой им гипотезе о природе тепла, оно обязано своим происхождением «энергичному, сдерживаемому движению внутри маленьких частиц материи». В этой же работе можно заметить зародыши нашей современной системы размерностей, базирующейся на трех фундаментальных физических величинах: массе M , длине L и времени T , которые, будучи выраженными соответственно в граммах, сантиметрах и секундах, дают абсолютную систему единиц (СГС).

В наше время вошло в привычку выражать при помощи этих единиц все, что поддается измерению, без ссылки на чисто количественные или специфические факторы, благодаря которым эти значения считались общепризнанными. Кстати, подобный подход позволяет современной науке избежать дальнейших неловких вопросов об «истинной» природе этих единиц — о том, действительно ли они существуют как самостоятельные объективные реалии. В то же время трудно удержаться от искушения признать такую не поддающуюся ни созданию, ни уничтожению величину, как энергия, несуществующей, и именно это придает особое значение поиску законов сохранения.



Рис. 7. Граф Румфорд (1753—1814)

Законы термодинамики

В самом конце XVIII в. граф Румфорд (1753—1814) пришел к выводу о том, что тепло является формой движения. Уроженец Северной Америки граф Румфорд (Бенджамин Томсон) известен как основатель Лондонского Королевского института (1799). Главной своей задачей он считал поиск более совершенных способов управления огнем. Вывод Румфорда основывался на его широко известном эксперименте, в котором кипение воды достигалось за счет тепла, выделявшегося при сверлении ствола пушки механизмом, приводимым в движение лошадьми.

К подобному же мнению в 1799 г. пришел и Дэви после экспериментов, в результате которых он добился таяния льда путем

трения двух его кусков друг о друга в условиях вакуума. Но прежде чем стало возможным дальнейшее развитие динамической теории тепла, и в частности той ее области, которая занимается исследованием веществ в газообразном состоянии (кинетическая теория газов), необходимо было избавиться от путаницы, обусловленной, главным образом, укоренившимся ошибочным употреблением термина «сила» вместо «энергия», например в выражении «сохранение сил». Кинетическая теория сыграла ведущую роль в установлении объективности закона сохранения энергии именно потому, что энергия газов легко измерима, в то время как массу, силу и скорость, возникшую в процессе движения, непосредственно установить невозможно.

Первый закон термодинамики, выражающий связь между двумя формами энергии — теплом и работой, был открыт в результате хорошо известных экспериментов Джоуля (1843—1849) из Манчестера, который определил механический эквивалент тепла, а также в результате теоретических изысканий немецкого физика Майера (1842). Позднее этот закон был распространен на все формы энергии; смысл его сводился к следующему: при исчезновении или появлении энергии в одной форме энергия в другой форме появляется или исчезает в постоянном соотношении. Из этого и был сделан вывод о том, что энергию, как и материю, нельзя уничтожить или создать из ничего.

Более сложный второй закон термодинамики (как он теперь называется) был абсолютно точно выведен в 1824 г. Карно, причем не из динамической, а из тепловой теории; поэтому его гораздо легче понять, рассматривая тепло как флюид, чем как вид движения.

Теорема Карно, по-видимому, является самым замечательным примером чисто логического доказательства в науке XIX в., несколько напоминающим установление Эйнштейном взаимозависимости массы и энергии: в обоих случаях выводы не вытекают из хода доказательства, и, к тому же не была использована ни одна из известных теорий о природе энергии. Основанная Карно термодинамика до сих пор в целом придерживается предложенных им принципов.

Ученый уподобил механическую силу тепла силе давления водяного столба. Подобно воде, совершающей работу при падении на более низкий уровень, тепло совершает работу только при понижении температуры. Знаменитая теорема Карно $W/H = (T_1 - T_2)/T_1$ (т. е. количество тепла, способного совершить работу, равно отношению разницы температуры к первоначальной температуре, измеряемой в градусах Цельсия от абсолютного нуля (-273°C)) предшествовала и привела к появлению понятия об абсолютном нуле — температуре, при которой любое тело полностью лишено тепла. Применительно к тепловой теории эта теорема до определенной степени представляет собой аксиому, поскольку

ку начальная температура является мерой количества тепла, запасаемого рабочим телом, а конечная температура определяет количество оставшегося в нем тепла. Что бы ни произошло с рабочим телом при падении температуры, ясно лишь одно: часть тепла (обычно незначительная), покидающего рабочую систему, в любом случае может быть соотнесена с работой, проделанной системой.

В динамике и статике размерности силы ML/T^2 , а энергии ML^2/T^2 . Поскольку размерность скорости (V) есть L/T , а импульса MV или ML/T , то силы измеряются изменением импульса, который они сообщают свободно движущейся массе в единицу времени, а энергия — вычисленной таким образом затраченной силой действия и расстоянием действия этих сил (т. е. расстоянием, на которое они способны продвинуть подвергнутое воздействию тело). В системе СГС за единицу силы принято считать силу в 1 *дину*, т. е. силу, необходимую для придания свободно движущемуся телу массой 1 *г* скорости 1 *см/сек*. Поскольку сила земного притяжения, действующая на массу 1 *г*, составляет примерно 980 *дин*, то 1 *дина* приблизительно равна весу тела с массой 1 *мг*. Единицей энергии в системе СГС является эрг — кинетическая энергия, сообщенная свободно движущейся массе в 1 *г* силой в 1 *дину* на расстоянии 1 *см*. Из выражения для кинетической энергии $MV^2/2$ вытекает, что 1 *эрг* равен энергии свободно движущегося со скоростью 1 *см/сек* тела с массой 2 *г*. Единицей тепловой энергии в системе СГС является калория, равная количеству тепла, необходимого для нагрева 1 *г* воды на 1°C, и эквивалентная 41,8 млн. *эрг*. Следовательно, чтобы перевести калории в абсолютные единицы энергии, нужно их умножить на это число.

Поскольку давление определяется как сила, действующая на единицу площади, а объем имеет размерность L^3 , то произведение давления и объема, так же как и произведение силы и длины, является выражением количества энергии. Если объединить законы Бойля — Мариотта и Гей-Люссака, определяющие зависимость объема от давления и температуры, получится простейшее уравнение $PV=RT$, где T — абсолютная температура, R — постоянная величина для всех газов, взятых в равном объеме V при одинаковой температуре T и давлении P . Как уже отмечалось, точность вычисления по этой формуле увеличивается по мере удаления температуры газа от точки сжижения. Следует отметить, что R (или PV/T) представляет собой величину, вычисленную сугубо экспериментально и имеющую одинаковое значение для равных объемов различных газов (при одинаковой температуре и давлении) и, следовательно, согласно закону Авогадро, для одинакового количества молекул. Если данное уравнение отнести к грамм-молекуле газа, т. е. к 2 *г* водорода, 32 *г* кислорода и т. д., то R в тепловом выражении будет равно почти точно 2 *кал*. Однако в данный момент наша задача заключается не в подробном рассмотрении этого закона, а в том, чтобы показать, к чему он ведет.

Левая часть уравнения (PV) выражает энергию, необходимую для превращения твердого вещества, взятого в незначительном объеме, в газообразное путем преодоления внешнего давления P . В качестве примера можно привести превращение в газ твердого вещества в цилиндре с подвижным поршнем, который, преодолевая атмосферное давление, выдвигается до тех пор, пока объем цилиндра не увеличится от нуля до V . Эта тепловая энергия используется в дополнение к энергии, необходимой для поднятия температуры газа. Отсюда следует, что молекулярная теплоемкость газа (равная произведению удельной теплоемкости на молекулярную массу и обозначаемая c_p) при постоянном давлении и способности к расширению всегда на две единицы больше молекулярной теплоемкости газа при постоянном объеме c_v , когда нет необходимости совершать работу по преодолению атмосферного давления.

Соотношение этих двух теплоемкостей c_p/c_v или $(c_v+2)/c_v$ несложно определить экспериментально, исследуя скорость звука в газообразной среде. Это соотношение неизменно при рассмотрении такой сложной структуры, как молекула, и при определении числа составляющих ее атомов, причем это соотношение по мере увеличения сложности молекулы уменьшается. Для одноатомных газов нулевой группы периодической системы, а также в целом для металлов (как, например, для ртути в летучем состоянии) это соотношение составляет $5/3$ (следовательно, $c_v=3$); для двухатомных газов оно обычно равно $7/5$ и т. д. При этом числитель и знаменатель различаются на число 2, но оба увеличиваются на равное целое число по мере возрастания количества тепла, используемого для создания внутреннего движения в молекулярной структуре, а не ускорения процесса перехода молекул. Если рассматривать только одноатомные газы, молекулы которых являются не структурами, а обособленными атомами, то можно сказать, что тепло, расходуемое на увеличение энергии перехода атомов, составляет 3 кал на одну грамм-молекулу при повышении температуры на 1°C . Процесс этот не зависит от массы атома или молекулы, и закон Авогадро означает, что средняя кинетическая энергия перехода одинакова для всех молекул, легких или тяжелых, и поэтому их средняя скорость, вычисленная из кинетической энергии, должна быть обратно пропорциональна корню квадратному из их массы, т. е. для водорода в четыре раза большей, чем для кислорода.

Кинетическая теория газов

Приведенные выше выводы идентичны выводам физиков и математиков, развивших кинетическую теорию путем применения обычных законов динамики к любому скоплению свободно движущихся частиц. Постоянно сталкиваясь друг с другом и со стен-

ками сосуда, частицы приходят в состояние равновесия, при котором, несмотря на значительные различия в скорости даже для одинаковых по массе тел, кинетическая энергия распределяется между ними поровну независимо от массы, причем легкие частицы имеют в среднем такую же энергию, как и тяжелые. Это первое следствие, которое вытекает из отличающегося высокой степенью обобщения закона, известного как *закон равномерного распределения энергии*.

Другим следствием является то, что этот закон применим к каждому отдельному виду самостоятельного движения частицы (который, в связи с этим называется *степенью свободы*). Сюда относятся движения вращательное, колебательное и прямолинейное, причем на каждую степень свободы приходится в среднем одинаковая доля энергии. Не вдаваясь в подробности данного вопроса, отметим только, что прямолинейное движение обладает тремя степенями свободы, по одной для каждой из трех пространственных координат. Следовательно, в одноатомной молекуле, обладающей теплом в 3 кал/град , каждая из степеней свободы представлена одной калорией, а две дополнительные калории, поглощенные двухатомными молекулами, свидетельствуют о наличии двух дополнительных степеней свободы, что происходит благодаря взаимной циркуляции формирующих их двух атомов.

Еще один, более важный для нас, вывод касается молекулярной теплоты твердых веществ, в которых составляющие их атомы не имеют свободного прямолинейного движения, а находятся в состоянии постоянного колебания. Закон Дюлонга и Пти, согласно которому атомная теплоемкость элементов примерно постоянна и равна 6 кал/град , уравнивает, подобно маятнику, среднюю кинетическую и потенциальную энергию, причем первая из них равна 3 кал/град (как для одноатомных газов), а вторая также добавляет три калории, доводя общую сумму тепла до шести калорий. Если все это соответствует действительности, то в таком случае динамические законы, касающиеся равномерного распределения энергии, могут быть выражены двумя основными способами, значительно отличающимися друг от друга: химический эквивалент атомной массы можно вывести из плотности газа при помощи закона Авогадро или же, основываясь на законе Дюлонга и Пти, — из атомной теплоемкости. Если за кинетическую энергию прямолинейного движения одной грамм-молекулы принять 3 ккал/град , то очень просто рассчитать «среднюю» скорость молекул, основываясь на уже имеющихся данных. Так, для водорода при 15°C (288°K) она составляет около $1,9 \text{ км/сек}$. В данном контексте слово «средняя» обозначает не среднее линейных скоростей, а корень квадратный из их средних квадратов.

Следует отметить, что полученный результат не зависит от числа молекул в грамм-молекуле M , поскольку кинетическая энергия M граммов не изменяется при разделении общей массы на час-

ти (если, конечно, условимся считать «среднюю» скорость отдельных частей равной «средней» скорости целого). Так, 2 г водорода обладают кинетической энергией прямолинейного движения, равной 3*T* калорий, что при температуре 15°C составит 864 кал, или $3,6 \cdot 10^{10}$ эрг. Поскольку масса равна 2 г, то ее корень квадратный ($1,9 \cdot 10^5$) и будет скоростью в километрах в секунду, т. е. 1,9 км/сек.

Кинетическая теория газов применима также к жидкостям в той мере, в какой это касается их внутренних слоев, где взаимоприятия молекул, вызывающие сжижение, уравнивают и ликвидируют друг друга. На поверхности же, где взаимоприятия совершенно не уравновешены, они создают поверхностное натяжение, заставляющее каплю из всех возможных форм принимать сферическую. Однако в поверхностном натяжении участвует только очень тонкий слой, в который входит немного молекул. Во внутренних слоях жидкости действует осмотическое давление, аналогичное газовому. Это явление открыл фитофизиолог Пфедер, установивший, что именно осмотическое давление заставляет соки поступать к растущим деревьям и растениям. Для наглядной демонстрации этого процесса требуется полупроницаемая мембрана, которую нетрудно искусственно создать по образцу клетки растения и которая свободно пропускает воду и другие жидкости, задерживая тем не менее растворенные в них вещества. В результате исключительно под влиянием молекул этих веществ создается несбалансированное (осмотическое) давление, которое может достичь нескольких сот атмосфер при сильной концентрации раствора и которое сложно (но все-таки можно) непосредственно измерить.

Для нашего исследования важность открытия осмотического давления заключается в том, что оно заполнило пробел в вопросе определения молекулярной массы нелетучих органических соединений, что вначале являлось серьезным препятствием на пути исследования их структуры.

Термодинамика предлагает нам два простых экспериментальных способа косвенного определения осмотического давления, а именно:

- 1) повышение точки кипения и
- 2) понижение точки замерзания раствора, вызываемые растворенным в нем веществом.

С помощью этих методов молекулярную массу нелетучих растворимых веществ стало теперь так же легко определять, как и молекулярную массу летучих веществ по плотности пара. Однако более важным в теоретическом плане явилось последовавшее за этим открытие полной или частичной диссоциации электролитов в водном растворе на положительно и отрицательно заряженные ионы, которое привело к появлению уже упомянутой теории Аррениуса и к которому мы возвратимся несколько позже.

Броуновское движение и число Авогадро

Наиболее важные выводы из изменившихся взглядов на природу молекулы были сделаны уже в нынешнем веке, но для удобства они включены в эту главу, поскольку ими было завершено длительное и нелегкое создание теоретической модели. Кроме того, основы теории были преимущественно развиты еще в прошлом веке такими представителями математической физики, как Крониг, Клаузиус, лорд Кельвин, Дж. Клерк Максвелл и позднее Больцман, К. Е. Мейер и Ван-дер-Ваальс. В первом десятилетии XX в. французский физикохимик Жан Перрен сумел не только убедительно доказать, что броуновское движение является не чем иным, как постоянным движением молекул, но и подсчитать (исключительно экспериментальным путем) число молекул в грамм-молекуле. Это число равно $6 \cdot 10^{23}$, обозначается символом N_A и названо в честь того, кто его ввел, *числом Авогадро*.

Первым результатом применения ахроматического объектива в микроскопических исследованиях явилось *броуновское движение*, названное по имени его открывателя — естествоиспытателя Броуна. Однако потребовалось целое столетие для того, чтобы доказать, что при увеличении разрешающей способности микроскопа можно увидеть, но не различить, наиболее крупные частицы, благодаря их постоянному движению, так как их кинетическая энергия равна $3T/N_A$ калорий независимо от того, является ли эта частица молекулой газа или же микроскопической твердой или жидкой частицей, образующей эмульсию. Перрен доказал, что каждая частица (меньше определенного размера) движется чрезвычайно быстро и хаотично; частицы движутся так быстро, что кажутся просто живыми, причем самая высокая скорость наблюдается у наиболее маленьких частиц.

Одним из самых замечательных экспериментальных и теоретических исследований в науке является исследование Жана Перрена, доказывающее, что в эмульсии распределение отдельных частиц по вертикали подобно распределению молекул газа в атмосфере и подчиняется тому же геометрическому закону рассеяния. Плотность атмосферного воздуха, в 14,4 раза превышающая плотность водорода, уменьшается в два раза при подъеме на 6 км (с любого выбранного уровня). В водородной же среде плотность уменьшится в два раза лишь на высоте, большей в 14,4 раза (т. е. 86,4 км). Фракционированно центрифугируя эмульсию гуммигута и мастики, Перрен приготовил эмульсии, частицы которых обладали одинаковым размером и сферической формой. Измерив под микроскопом диаметр такой частицы, можно высчитать ее массу. Затем он также измерил под микроскопом «полувысоту» этих частиц, т. е. высоту, необходимую для уменьшения количества частиц в эмульсии в два раза. Для гранулы гуммигута диаметром 0,14 мкм (1 мкм равен 0,001 мм) полувысота составляет 0,1 мм, а

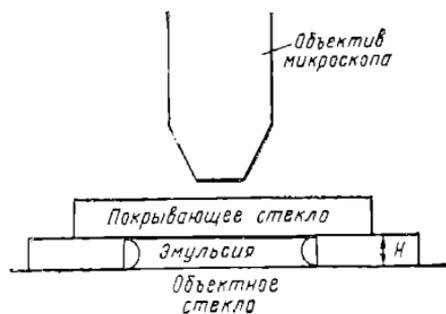
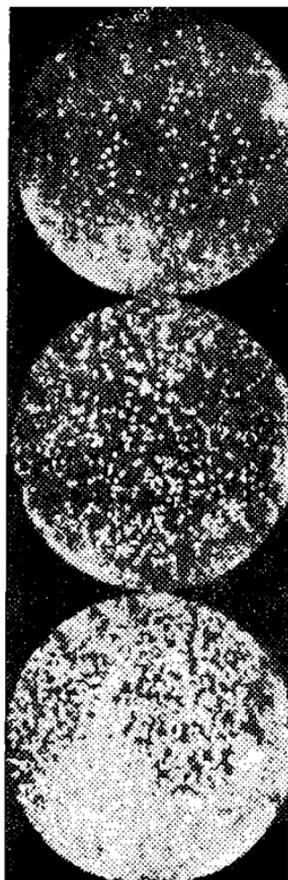
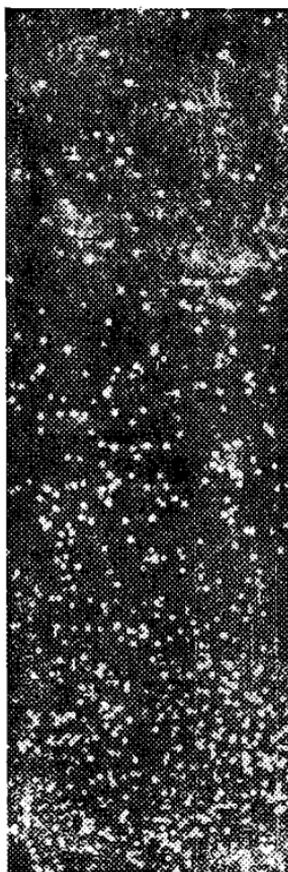


Рис. 8, 9, 10. Опыты Перрена по распределению по высоте коллоидных гранул

ее действительная масса, вычисленная из диаметра и плотности жидкости, — одна четырехсотмиллиардная грамма. Эта масса относится к массе молекулы водорода так же, как 86,4 км относится к 0,1 мм. На рис. 8 и 9, взятых из работ Перрена, показано распределение коллоидных гранул в зависимости от высоты. На рис. 8 видно распределение гранул гуммигута (0,6 мкм диаметром; четыре уровня через каждые 10 мкм); на рис. 9 — для гранул мастики (1 мкм диаметром, три уровня через каждые 12 мкм). На рис. 10 приведена диаграмма расположения предметов в опыте.

Величина N_A , полученная Перреном в результате этих экспериментов, оказалась на 12% больше приведенного выше значения $6 \cdot 10^{23}$, которое явилось средним результатом самых точных измерений, на какие только способна атомистика XX в. и которое точно, как считается, до 1%. Используя относительно крупные сферические гранулы (они были помечены снаружи для лучшего наблюдения за их вращением), Перрену даже удалось с помощью эйнштейновской математической теории процесса показать, что к их вращению применим закон равномерного распределения энергии.

Современное представление о молекуле

Таким образом, постепенно в течение века произошло коренное изменение первоначальных взглядов на молекулу, и она превратилась из мельчайшей частицы соединения (дальнейшее разделение которой приводит к распаду этого соединения на составляющие его элементы) в существующую длительное время свободно движущуюся частицу, обладающую кинетической энергией $3T/N_A$, где T — абсолютная температура, а N_A — число Авогадро. Это составляет $2,07 T \cdot 10^{-16}$ эрг или, используя новую единицу, о которой будет сказано позже, $1,3 T \cdot 10^{-4}$ эв (1 электронвольт = $1,59 \times 10^{-12}$ эрг). Для комнатной температуры в 15°C или 288°K получаем число, равное 0,038 эв. Правда, в химии до сих пор широко применяется первоначальное значение, но оно недостаточно определено, поскольку не существует четкой грани между химической и физической природой. С уверенностью можно сказать, что химическими по своей природе являются процессы диссоциации и полимеризации, как, например, в перекиси азота, которая при низкой температуре существует в виде бесцветных молекул N_2O_4 , а при температуре свыше 140°C — в виде молекул NO_2 настолько интенсивно оранжево-красного цвета, что в тонких слоях они кажутся черными. Однако результаты этих процессов, влияющие на плотность и окраску газов, в первую очередь физические по своему происхождению. С точки зрения химии изменения, происходящие в процессе соединения молекул подобного вида, необязательно имеют важное значение. Молекулярная теория имеет дело с равномер-

ным распределением энергии, а не материи (как в атомистической теории), но поскольку энергия является непрерывной функцией температуры, то ее «атома», подобного атому материи, не существует.

Электричество

Янтарь по-гречески — электрон. Утверждают, что уже Фалесу было известно о свойстве янтара притягивать, если его натереть, легкие частицы. И тем не менее учение об электричестве и магнетизме является самой молодой из существующих наук, и ее зарождение принято относить к 1600 г., когда Вильям Гильберт написал книгу о магнитах и электрическом притяжении. XVII в. принес первую электростатическую машину Герике (1672 г.): при вращении серного шара вокруг своей оси создавалось трение, и в результате возникали слабые электрические искры. Изобретатель открыл, что тела, заряженные этими электрическими искрами, отталкивают друг друга. В следующем веке Грей, экспериментируя с металлической проволокой и шелковыми шнурами, впервые ввел понятия об изоляторах и электрических проводниках. Дюфе обнаружил два вида статического электричества, возникающего в результате трения стеклянных или смолистых веществ; теперь мы их соответственно называем положительным и отрицательным электричеством. Этот ученый является автором теории двух флюидов, созданной в противоположность теории одного потока Бенджамина Франклина (1706—1790). Теория Франклина подобна ныне утвердившемуся взгляду на теплоту как на единую сущность, и отсюда холод определяется как отсутствие теплоты. Но, к сожалению, истинной единой сущностью, чаще проявляющей себя в электрическом «флюиде», является то, что было названо отрицательным электричеством, а под положительным электричеством следует понимать отсутствие отрицательного.

Создание лейденской банки датируется 1746 г., а в 1752 г. был произведен знаменитый эксперимент с бумажным змеем, принесшим молнию на землю. Проводивший этот эксперимент Бенджамин Франклин чудом избежал смерти; жертвой молнии год спустя стал Рихман, повторивший этот же опыт. Кулон изобрел пружинные весы и с их помощью открыл законы электрического и магнитного притяжения, согласно которым эти притяжения уменьшаются пропорционально квадрату расстояния. Практически все важные открытия в области электричества были сделаны в XIX в. В 1780 г. Гальвани обнаружил, что отрезанные лапки лягушки являются чувствительным электроскопом, реагирующим на прохождение вблизи от них электрического заряда, и это привело к открытию контактного электричества, возникающего при контакте неодинаковых металлов. Работы Гальвани, в свою очередь, позволили Воль-

та в 1799 г. сконструировать прообраз электрической батареи, представляющей собой набор чередующихся цинковых и медных или серебряных пластин, между которыми помещались бумажные или кожаные прокладки, намоченные в соленой воде. Буквально через несколько месяцев Карлейль и Никольсон озаменовали начало XIX в. открытием способа разложения воды на водород и кислород с помощью батареи Вольта.

Самое удивительное свойство батареи Вольта заключается в том, что, хотя энергию тока генерирует цинковая пластинка, растворяющаяся в кислотной среде, выделяемый при этом водород собирается на медной пластинке, так что образующаяся при данной реакции газовая пленка вызывает поляризацию и практически полное прекращение процесса, нарушая циркуляцию. В современной первичной батарее, ведущей свое начало от электролитической ванны Даниэля, прекращение реакции предотвращается путем погружения меди или другого положительно заряженного элемента в пористую керамическую ванну, содержащую деполаризующую жидкость, в качестве которой Даниэль использовал раствор медного купороса, а другие ученые, например Бунзен и Гров, — такой окисляющий реагент, как азотная кислота. При использовании в качестве окислителя растворимого бихромата пористый сосуд не нужен. Однако Дэви удалось в 1808 г. осуществить свое знаменитое разложение щелочных расплавов и получить в чистом виде ярко выраженные щелочные металлы — натрий и калий, которые воспламеняются и взрываются при соприкосновении с водой — именно с помощью быстро разряжающейся первоначальной батареи, что делает это историческое открытие Вольта еще более замечательным.

Важнейшими вехами на пути развития науки в XIX в., о которых необходимо здесь упомянуть, являются два открытия, сделанные Фарадеем (1791—1867). Это — установление природы электролиза и открытие явления электромагнитной индукции. Фарадей мысленно допустил, что электропроводность электролитов (жидкостей, которые проводят ток и одновременно разлагаются им) обусловлена движением ионов. Ионы представляют собой положительно и отрицательно заряженные молекулы, притягиваемые соответственно отрицательно и положительно заряженными электродами, где они теряют свой заряд, высвобождаются затем в виде газов или осаждаются на электродах в виде металлов. Несложные законы электролиза, выведенные Фарадеем, можно суммировать следующим образом: при прохождении одного и того же количества электрического тока подряд через несколько жидкостей выделяются разные количества продуктов разложения, пропорциональные их химическим эквивалентам. Таким образом, современная единица фарадей (F), равная $96\,500$ кулон ($2,9 \cdot 10^{14}$ абсолютных электростатических единиц), выражает количество электричества, переносимого 1 грамм-эквивалентом (1 г водорода, 8 г кислорода,



Рис. 11. Майкл Фарадей (1791—1867)

31,5 г меди в медных солях и т. д.). Однако к логически вытекающему из сказанного выше заключению о том, что электричество также состоит из атомов, наука пришла только в 1874 г., когда на это указал Джонстон Стони, а в 1881 г. эту же мысль весьма кстати высказал Гельмгольц, выступая на мемориале Фарадея в Лондонском химическом обществе. Тем не менее анализ некоторых работ Фарадея показывает, что он первым выдвинул идею о материальности тока. Ныне вполне очевидное отношение $F = N_{\text{де}} e$ (где e — «атомный заряд», или заряд, несомый одновалентным ионом) позволяет нам определить $N_{\text{А}}$ через e . Именно с помощью этого метода, используя установленное Милликенем в нашем веке значение e , удалось опре-

делить число Авогадро $N_{\text{А}}$, о котором уже упоминалось выше.

Заслуживают также внимания точки зрения Дэви и Берцелиуса, изложенные ими соответственно в 1807 и 1812 гг. Как это ни удивительно, история сжалилась над высказыванием Дэви о том, что «сила электричества и сила химического сродства идентичны», хотя современная интерпретация этой фразы могла бы удивить самого ее автора, жившего в далекую от совершенства эпоху развития химии. Дело в том, что мощные силы химического сродства представляют собой всего-навсего ничтожный остаток от колоссальных первичных электрических сил, которые почти полностью равномерно сбалансированы во всех направлениях только в элементах нулевой группы. В то же время с более тщательно разработанной теорией Берцелиуса история обошлась жестоко, хотя на первых порах после своего появления она оказала значительное влияние на химию.

К сожалению, Берцелиус считал, что атомы содержат в себе разные количества двух видов электричества, что является причиной проявляемой ими полярности. Однако это прямо противоречит тому факту, что элементы электрически нейтральны в не меньшей степени, чем их соединения. Полярность атомов мы приписываем теперь их асимметричной структуре (за исключением элементов нулевой группы, которая создает, благодаря одинаковым положительным и отрицательным зарядам, остаточное локальное поле направленных электрических сил). Этим и объясняется то, что они проявляют химическое сродство. Будучи сторонником взгляда Ла-

вауэе, что кислород является кислотообразующим компонентом, Берцелиус считал кислород наиболее электроотрицательным элементом, поэтому элементы, окислы которых являлись основными, он называл электроотрицательными, а если их окислы являлись кислотными, то такие элементы он называл электроотрицательными. Его дуалистическая система предполагала, что химические соединения состоят из сочетания двух противоположно заряженных групп (или *радикалов*), а соли являются двойственными соединениями окислов металлов и неметаллов. Однако задолго до этого Дэви, Гей-Люссак и Тенар установили, что открытой Шееле хлор является элементом. Лавуазье, согласно своей теории кислот, рассматривал хлор как окисел хлористоводородной, или muriевой (соляной) кислоты, а саму кислоту назвал «оксимуриевой», в то время как обыкновенная соль и соляная кислота, к примеру, являются двойными соединениями отдельных атомов, ни одно из которых не содержит водорода. Этот факт привел к признанию того, что водород является компонентом, формирующим кислоты, и что водород, содержащийся в кислоте, может быть замещен металлами с образованием при этом соли. Со временем теория замещения была распространена на многоосновные кислоты, содержащие несколько атомов водорода, в которых каждый атом замещается по очереди.

Теория электролитической диссоциации Аррениуса

Как уже говорилось выше, в теоретическом плане самым важным выводом из распространения газовых законов на жидкости и открытия метода установления молекулярных масс по осмотическому давлению явилось следующее: стало очевидным, что в сильных электролитах, таких, как минеральные кислоты и основания, а также в их солях (в твердом состоянии или растворе) ион Фарадея существует самостоятельно в виде отдельной молекулы. Открытие теории электролитической диссоциации Аррениуса, как она теперь называется, датируется 1883 г., и поначалу даже самым выдающимся физикам и химикам она казалась почти невероятной. Однако в наши дни в ее справедливости никто не сомневается: ныне считается, что отдельные ионы, как и элементы нулевой группы, не обладают способностью соединяться химически, и, таким образом, даже в твердом кристалле они существуют раздельно. В подобных случаях соединение, как, например, соединение положительного иона натрия и отрицательного иона хлора в обыкновенной соли, является чисто электрическим и происходит благодаря стремлению равного числа этих ионов к электрической нейтральности. Истинное же химическое сродство проявляется в стремлении атома хлора к приобретению отрицательного электрического заряда, называемого теперь электроном (или негатроном), и способствует заимствованию у атома натрия одного из его электронов, оставляя, та-

ким образом, этот атом положительно заряженным. Кислотный характер определяется положительным ионом водорода, H^+ , т. е. атомом водорода, потерявшим один электрон (именно H^+ ошибочно называли протоном), а кислотность измеряется концентрацией ионов водорода. Подобным образом основность определяется отрицательным ионом гидроксила (OH^-). Чистая вода, являясь почти полностью неподдающимся диссоциации соединением иона H^+ и гидроксила OH^- , представляет собой великолепный изолятор.

Электромагнитная теория света

Второе открытие Фарадея — электромагнетизм — имело огромную теоретическую, а также более известную практическую ценность, дав возможность механически, при помощи динамомашин, генерировать электрический ток и преобразовывать энергию при помощи электрического двигателя. Теория света, который, согласно Юнгу (1733—1829), имеет волновую природу, благодаря работам Дж. Клерка Максвелла и других ученых превратилась в электромагнитную теорию света, не вызывавшую никаких сомнений вплоть до конца прошлого века.

Когда Малюс (1755—1812) обнаружил, что поляризация света (до него это явление считалось изолированным, свойственным только одному необычному минералу, состоящему из кристаллов с двойной рефракцией, — так называемому исландскому шпату) может быть получена в результате отражения (1805), и когда стало известно, что это обычное свойство света, более ранней теории Гюйгенса стало уже недостаточно. Однако и в этой теории не обошлось без постулирования «чрезвычайно упругого флюида» — светоносного эфира, передающего свет при помощи пульсирующего или волнообразного движения. Рефракция света объяснялась уменьшением скорости света в плотной среде. Экспериментальное подтверждение этого объяснения позднее рассматривалось как решительное испытание для волновой и корпускулярной теорий, увенчавшееся победой первой из них. Поначалу же считалось, что электромагнитные колебания имеют ту же природу, что и звуковые, выражающуюся в поочередном сжатии и разрежении молекул воздуха в направлении движения света. Для объяснения явления поляризации Юнг в 1817 г. выдвинул гипотезу, согласно которой световые колебания происходят в плоскости, расположенной под прямым углом к направлению движения света. Эта гипотеза позволяла рассматривать поляризацию как разложение разнонаправленных колебаний одной плоскости всего на два направления, находящиеся под прямым углом друг к другу и к направлению движения света.

Особенность открытых Фарадеем явлений электромагнетизма заключается в том, что они по своей сути трехмерны, причем каж-

дое из измерений взаимосвязано с двумя другими. Подвижный электрический заряд (электрический ток) во всех направлениях создает электрические и магнитные силы, расположенные под прямым углом друг к другу и к направлению движения. Согласно электромагнитной теории, свет и другие формы излучения исходят от своего источника в виде быстро сменяющихся друг друга электромагнитных силовых полей, распространяясь сферическими волнами под прямым углом к направлению движения света со скоростью $3 \cdot 10^{10}$ см/сек, если не брать в расчет трение воздуха.

Для того чтобы наглядно представить природу света и других видов излучения, их вначале объясняли, как в случае тепла и электричества, наличием неких невесомых флюидов и флюидных потоков, что позволяло лучше понять их перемещение с места на место. Считалось, что светоносный эфир должен быть в высшей степени разреженным и упругим, поскольку волнообразное движение распространяется в нем с огромной скоростью. Для теплового (в отличие от излучаемого) потока объяснение с помощью флюидов перестало быть необходимым после того, как оно было общепризнано в качестве самостоятельного вида движения молекул вещества независимо от того, находятся ли они в свободном состоянии (например, в одноатомных молекулах), связанном (как в твердых веществах, где свободное перемещение невозможно из-за сцепления молекул друг с другом) или же в комбинации этих двух состояний (например, обычные газы или внутренние слои жидкости). Тем не менее электричество на протяжении всего XIX в. считалось флюидом, поскольку об атомистической или электронной природе флюида даже в конце столетия было весьма смутное представление. По-настоящему свободное перемещение электронов возможно только в безвоздушном пространстве, где отсутствует материя, и это объясняется тем обстоятельством, что между атомами электричества и атомами вещества, также содержащего электроны, действуют чрезвычайно мощные силы притяжения и отталкивания. Однако все формы излучения — радиоволны, излучаемое тепло, свет, рентгеновское и γ -излучение — считаются особым видом ограниченного движения, называемым *электромагнитным*. Различаются же они или частотой ν , под которой подразумевается число завершенных колебаний в секунду, или длиной волны λ , т. е. расстоянием между гребнями двух волн. Таким образом, $1/\lambda$ представляет собой количество завершенных колебаний на сантиметр, а λ равна c/ν , где c — скорость света, равная $3 \cdot 10^{10}$ см/сек.

Отсюда видно, что бесконечность расстояния, на которое излучение может распространяться от своего источника (как, например, электрон при вынужденном движении), настоятельно требует наличия в вакууме колебаний. В наши дни светоносный эфир насмешливо называют существительным от глагола «колебаться», и корпускулярная теория Ньютона ныне обрела новую форму: свет прерывист и состоит из фотонов. Тем не менее установлено, что

четкое разграничение между двумя этими теориями неприменимо в целом к атомистике, где частица отождествляется с волной и наоборот. В этом заключается основная дилемма современной физики, и именно это обстоятельство способствовало возрождению в науке метафизических сомнений, которые по своей сути мало чем отличаются от господствовавшей в Древней Греции философской школы, считавшей невозможным познание истинной природы вещей, поскольку мы можем судить о них только через наше чувственное восприятие.

Подобные вопросы в науке разрешаются с помощью фактов, и поэтому в наше время было бы софистикой открыто и настойчиво утверждать, что внешний мир, лежащий за пределами чувственного восприятия, нам недоступен. Это заблуждение легче преодолеть, если вспомнить, что светоносный эфир, как до него флюгистон, теплород или электрические флюиды, предшествовал признанию энергии сущностью, которую нельзя сотворить или уничтожить и которая обладает массой. Помня о том, как постепенно постулирование теплородного и электрического флюидов перестало быть необходимым, мы логически приходим к очень простому выводу, а именно, что при передаче излучения колебания вызывает электромагнитная энергия. Другими словами, признание энергии, и в частности того факта, что она обладает масс-эквивалентом, освобождает нас от необходимости постулирования некоего универсального эфирного посредника, отбрасывая в сторону метафизику и ныне существующие трудности, заключающиеся в том, как примириться с двойственностью излучения, которое существует и как волна, и как частица.

Спектральный анализ

Успехи ученых прошлого века в области науки о свете, по-видимому, представляют собой самые замечательные экспериментальные открытия, во-первых, потому, что они казались практически недостижимыми, и, во-вторых, потому что они значительно содействовали развитию физики. Спектральный анализ (как его теперь называют) позволил при помощи призмы разложить свет на составляющие его цвета — согласно частоте и длине волны этих цветов. Спектральный анализ позволяет также исследовать составные части вещества, излучающего свет. При этом абсолютно безразлично, исходит ли свет от вещества на лабораторном столе или же от далекой звезды, где он зародился еще до нашей эры и только сейчас, двигаясь со скоростью 300 000 км/сек, достиг Земли.

В 1802 г. Волластон (1766—1828) впервые заметил, что разложенные призмой спектры солнечного света и пламени свечи или электрической искры значительно отличаются друг от друга. Од-

нако более основательно это явление было исследовано несколькими годами позже баварским оптиком Фраунгофером. Внимание Фраунгофера привлек тот факт, что темные линии поглощения (названные впоследствии его именем) в солнечном спектре отличаются от линий звездного спектра, что ясно указывало на различие в излучаемом этими телами свете. В 1827 г. Гершель пришел к выводу о том, что специфические цвета, придаваемые огню (спектру пламени) многими солями, в частности солями щелочных и щелочноземельных металлов, позволяют просто и надежно устанавливать наличие этих солей даже в самых незначительных количествах. Так, одним из наиболее распространенных примеров является определение натрия по желтому цвету, который излучает соль, помещенная над огнем. Когда в 1860 г. Бунзен и Кирхгоф впервые использовали этот метод для обнаружения новых элементов — рубидия и цезия; им пришлось выпарить 40 т воды из Дюркхаймского источника и переработать 3 ц петалита для того, чтобы получить необходимое для опытов количество этих новых элементов.

«Лучевая материя»

К концу прошлого века ученые в основном пришли к выводу о том, что для молекул характерными являются полосатые спектры, представляющие собой не резко очерченные линии, а широкие полосы света, а для атомов — линейчатые спектры. Однако по-прежнему считалось, что полностью отличающиеся от других линейчатые спектры нагревания (как, например, в огне или вольтовой дуге) и электрической искры независимо от того, использовалась или нет лейденская банка или другой конденсатор, объясняются истинной трансмутацией, или диссоциацией химических элементов; такой точки зрения придерживался, например, Норман Локьер. В наши дни известно, что причина этого отличия заключается в том, что на разных стадиях нагрева вещества происходит различная ионизация атомов, которая и обуславливает процесс испускания света.

В конце прошлого века созрели условия для того, чтобы сделать большой шаг в области познания природы электричества. Одним из первых практических достижений электромагнетизма, таким же важным для науки, как изобретение динамомашин или двигателя для техники, явилось создание в 50-х гг. XIX в. Румкорфом индукционной катушки. Изобретение Румкорфа позволило генерировать электричество высокого напряжения в гораздо больших количествах, чем с помощью электростатических машин. Развитие спектроскопии привело к тому, что ее стали широко использовать для получения как обычных, так и искровых спектров элементов. Для исследования спектров газов применяли трубу Гейслера, в которой при низком давлении электрический ток за-

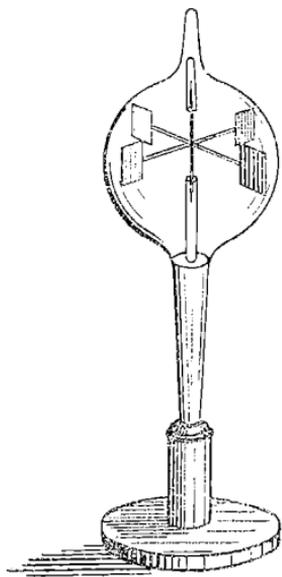


Рис. 12. Радиометр Крукса

ставлял светиться газы. Это, в свою очередь, дало возможность (с помощью насосов Гейслера и Шпренгеля, а также других типов ртутного насоса, создающих практически полный вакуум) достичь высокого разрежения.

Экспериментируя с ртутными насосами, сэр Вильям Крукс первым изобрел радиометр. Этот прибор (рис. 12) представляет собой вертушку, лопасти которой с одной стороны светлые, а с другой — темные; попадая в область света, вертушка быстро вращается. Поначалу считалось, что лопасти приводятся в движение давлением света, однако в наши дни установлено, что вращение происходит благодаря тепловому эффекту, оказываемому на лопасти оставшимся в сосуде газом. Подлинное (хотя и малое) давление света было открыто лишь в первом десятилетии нашего века русским ученым П. Н. Лебедевым (1866—1912). Однако, исследуя явление электрического разряда в приборе с высоким вакуумом,

В. Крукс установил, что в таком аппарате разряд протекает иначе, чем в обычной вакуумной трубе, и представляет, по его выражению поток «лучевой материи», испускаемой отрицательно заряженным электродом — катодом (теперь мы называем этот поток катодными лучами). Катодные лучи обладают удивительными качествами: они легко отклоняются от своего прямого пути под воздействием магнита, а на стекле и различных окислах оставляют светящийся фосфорический след. Обычно они движутся перпендикулярно к поверхности катода и могут быть сфокусированы вогнутым катодом, причем если в точке фокуса поместить платиновую пластинку («антикатод»), то она может накаливаться и расплавиться.

На рис. 13 и 14 показана принципиальная разница между электрическими разрядами в газовой среде при низкой и высокой степенях разреженности. На обеих иллюстрациях N — отрицательный электрод, а P и P' — два положительных электрода. При обычном вакууме разряд происходит в виде полос света (см. рис. 13), направленных от отрицательного электрода к положительному. Но если из колбы удалить практически весь газ, то разряд примет форму катодных лучей, летящих под прямым уг-

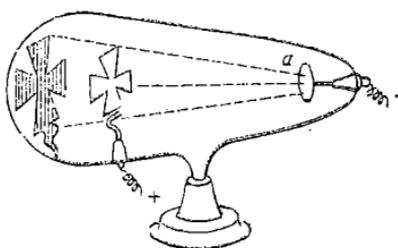
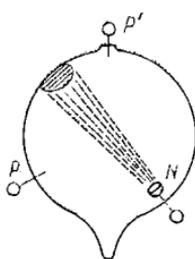
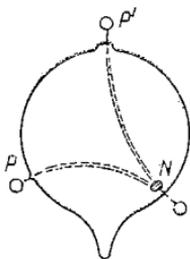


Рис. 13. Электрический разряд в газовой среде при низкой степени разрежения

Рис. 14. Электрический разряд при высоком вакууме

Рис. 15. Трубка Крукса с мальтийским крестом

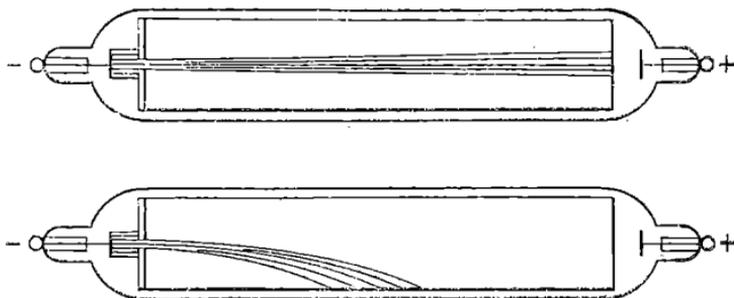


Рис. 16. Отклонение катодных лучей под действием магнитного поля

лом к поверхности отрицательного электрода, независимо от положения положительных электродов (см. рис. 14). На рис. 15, где изображена трубка В. Крукса с мальтийским крестом, видна увеличенная тень креста, отбрасываемая на флюоресцентном конце трубки катодными лучами, исходящими из точки *a*. Крест поддерживается стержнем, но если его убрать с пути катодных лучей, то можно увидеть его очертание на участке стекла, который ранее находился в тени и поэтому теперь стал более прозрачным, чем остальное стекло. На рис. 16 показано отклонение катодных лучей (отражающихся от экрана из виллемита) под действием магнита, расположенного перпендикулярно к плоскости бумаги. Отклонение, изображенное на нижней схеме, может быть вызвано южным по-

люсом магнита (если он расположен позади трубки) или северным (если его поместить перед трубкой), что свидетельствует о том, что лучи несут отрицательный заряд.

Подобные опыты проводились многими исследователями, в том числе и немецким ученым Ленардом, который установил, что катодные лучи могут проникать через очень тонкое окошко за пределы вакуумной трубки. Ленард первым исследовал их вне прибора, рассматривая их способность проникать в различные вещества, а также другие свойства.

Таким образом, в конце прошлого века были сделаны три великих открытия. Однако их было бы более удобно отнести к достижениям XX в., речь о которых пойдет в последующих главах.

Глава четвертая. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, РАДИОАКТИВНОСТЬ И ЭЛЕКТРОН

Можно сказать, что в определенном смысле история атомной энергии, если она вообще имеет начало, — древнее, чем мир, так же как мы говорим, что мир древнее человека. Ведь, согласно современным взглядам на атомную энергию, полностью вытекающим из ее истории, описываемой в данной работе, никакой другой из известных источников энергии не способен поддержать сияние Солнца и звезд в тот мельчайший отрезок космического времени, в течение которого существует мир, а возможно, и живые существа в какой-либо форме. Кроме того, можно сказать, что людям — по необходимости — всегда приходилось иметь дело с энергией, хотя прошло всего лишь около века с момента признания ее как таковой, т. е. единой сущностью, скрывающейся за всеми ее многообразными проявлениями. Если говорить в общих чертах о вероятных последствиях, которые можно ожидать от высвобождения атомной энергии, то в этом смысле наши дни находятся в таком же отношении к будущему, как эпоха, предшествовавшая открытию пара, относится к нашему времени. И однако никто пока еще не может даже приблизительно представить себе масштабы грядущих перемен или определить пределы того, что сейчас становится физически возможным.

Автору всегда казалось странным, насколько мало, по сравнению, например, с теорией эволюции, обращалось внимания на социальное значение столь грандиозной концепции, как концепция энергии, которая охватывает все без исключения формы жизни в противовес всеобщему и неизменяемому состоянию смерти. Эта концепция возникла непосредственно после проведения графом Румфордом уже упоминавшихся нами опытов по нагреванию воды до кипения с помощью энергии, получаемой при сверлении

стволов пушек механизмом, который приводился в движение лошадьми. Таким образом, человеческую энергию, использовавшуюся с первобытных времен для разжигания огня, Румфорд отождествил с лошадиной силой. С истинно ньютоновским размахом этот опыт Румфорда устанавливает правильное взаимоотношение внешнего мира не только с трудом, но и с жизнью.

Видимо, ученому миру предстоит еще окончательно приспособиться к переходу от труда животного к топливным двигателям. Если бы вдруг подтвердились сообщения о том, что в ожидании грядущего социального рая предпочтение отдается электрическим плитам, радиаторам и тому подобному в ущерб электростанциям и заводам, то окажется, что питающему древу цивилизации живительному соку, столь внезапно унаследованному человечеством в результате работ таких людей, как граф Румфорд, еще предстоит проделать немалый путь, прежде чем он достигнет вершины. И поэтому нетрудно в этой ситуации понять тех, кто не испытывает особого энтузиазма, видя, в чьи руки попал этот предназначенный для всего человечества дар научной мысли, увеличивающий в миллионы раз физические возможности людей. Точно так же нельзя быть спокойным, осознавая, что владеющие ныне этим даром не остановятся перед тем, чтобы взорвать мир, используя для этого любой сумасшедший предлог. Так или иначе, на доброе дело или во зло, а жребий брошен...

Обращаясь непосредственно к атомной энергии в том смысле, как мы понимаем ее сейчас, следует отметить, что даже само ее существование, не говоря уже о ее масштабах, не подозревалось и тем более не признавалось вплоть до начала нынешнего столетия. И действительно, в те времена вполне резонно выглядело предположение, согласно которому такая неизменяющаяся и неизменяемая вещь, как атом, внутренне полностью мертва, хотя внешне и проявляет достаточно признаков жизни. Тем не менее первое убедительное доказательство наличия на Земле атомной энергии (в отличие от общих признаний факта ее возможного существования) было сделано еще в прошлом веке. В 1895, 1896 и 1897 гг. подряд были сделаны три открытия в одной и той же, как поначалу казалось, области. Сначала Конрад Рентген обнаружил X-лучи (рентгеновское излучение), затем Анри Беккерель открыл явление радиоактивности, и, наконец, сэр Дж. Дж. Томсон пришел к выводу о том, что катодные лучи представляют собой свободный поток отрицательно заряженных электронов.

Рентгеновское излучение и электрон

Раньше других науке стала известна радиация, абсолютно индифферентная к оптическому различию между непрозрачностью и прозрачностью. Этому, безусловно, предшествовало открытие Ле-

народом свойства катодных лучей проходить сквозь тонкую пластинку золота; Ленард также обнаружил, что катодные лучи можно исследовать и за пределами колбы, если в ней сделать достаточно тонкое окошко. И хотя катодные лучи обладают очень слабой проникающей способностью, они, подобно рентгеновскому излучению, поглощаются веществом примерно пропорционально его плотности и независимо от его прозрачности. Эти катодные лучи генерируют в вакуумной трубке более эффективное рентгеновское излучение, причем наибольшая концентрация его достигается тогда, когда оно наталкивается на помещенную на его пути плотную металлическую преграду — антикатод. На рис. 17 изображена рентгеновская трубка сэра Герберта Джексона, в которой вогнутый катод фокусирует катодные лучи на антикатоде, сделанном из плотного металла, что позволяет определить происхождение рентгеновского излучения. Удивительная способность этого излучения проникать с одинаковой легкостью в непрозрачные и прозрачные вещества и выявлять, на основании разной их плотности, что находится внутри этих веществ, теперь хорошо известна и не нуждается в подробном описании. Сейчас мы знаем, что рентгеновское излучение является видом электромагнитного излучения, длина волны которого составляет всего около 0,001 длины волны видимого света. Открытие 1897 г. показало, что генерирующие их катодные лучи являются светящимися «атомами» отрицательного электричества. Их назвали *отрицательными электронами* и определили их скорость равной 0,1 скорости света. Как уже говорилось, атомистический характер электричества в не меньшей степени, чем вещества, является естественным путем объяснения простых законов электролиза Фарадея. Все фарадеевские «ионы» несут либо одинаковые заряды — положительные или отрицательные — либо просто целочисленные количества одинаковых зарядов. Метод, с помощью которого Томсон идентифицировал свободный электрон, был основан на одновременном отклонении траектории катодного луча в магнитном и электрическом полях таким образом, что эти два эффекта уравнивались. Таким образом удалось непосредственно вычислить скорость электрона, а также отношение заряда к массе e/m , которое, как было установлено, в 1845 раза больше, чем для одновалентного иона водорода при электролизе. Прибор, который использовал Томсон, графически изображен на рис. 18. Пластина D , заряженная отрицательно по отношению к пластинке E , отталкивает поток катодных лучей и вызывает перемещение светящейся точки в конце трубки из положения P в положение P' . Затем, чтобы привести точку в ее первоначальное неотклоненное положение, используется магнит. В таком случае скорость катодного потока представляет собой соотношение сил электрического и магнитного полей, выраженных в единицах СГС. Зная это соотношение, можно вычислить отношение заряда к массе e/m по двум отдельным отклонениям. Многие другие

опыты, в частности опыты Джона Таунсенда, о которых речь пойдет позже, продемонстрировали, что заряд электрона равен заряду одновалентного иона, поэтому масса электрона составляет всего $\frac{1}{1845}$ массы атома водорода или же $9 \cdot 10^{-28}$ г — наилегчайшая частица, известная науке. Электрон несет отрицательный заряд, равный, как принято считать, $4,8 \cdot 10^{-10}$ абсолютных электростатических единиц. Для этого количества электричества (положительного или отрицательного) сейчас часто употребляется термин «атом заряда»*.

Данный метод, первоначально умело примененный Дж. Дж. Томсоном и его ассистентом Ф. Астоном, был впоследствии значительно усовершенствован и в наши дни является наиболее точным для определения не только химических атомных масс, но и масс химических атомов, что не одно и то же; в этом мы убедимся позднее, когда речь пойдет об открытии изотопов. Пока же достаточно объяснить, что слово *изотоп* (обозначающее «одно и то же место») было предложено автором в 1913 г. применительно к элементам, имеющим одинаковые химические свойства, но атомы которых незначительно отличаются друг от друга по массе.

Радиоактивность

Думается, что химию нельзя безоговорочно назвать «французской наукой, основанной Лавуазье» (именно так выразился



Рис. 17. Рентгеновская трубка Г. Джексона

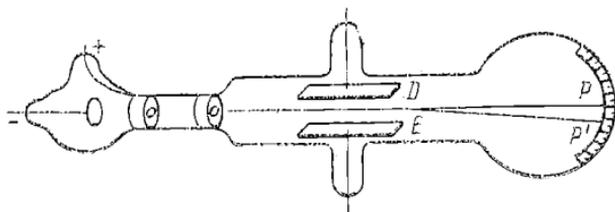


Рис. 18. Катодная трубка Дж. Дж. Томсона для измерения отношения заряда к массе электрона (e/m)

* Широкого распространения этот термин не получил. — Прим. ред.



Рис. 19. Первая урановая радиография, полученная Беккерелем

щих солей урана. Он обнаружил, что излучение этих солей подобно рентгеновскому и способно засвечивать фотографическую пластинку, помещенную за тонким металлическим экраном. Более того, к 1899 г. ему и другим физикам удалось установить идентичность этих «беккерелевых» лучей с катодными лучами Крукса и Ленарда, которые, как незадолго до этого доказал Томсон, являются электронами, с той только разницей, что некоторые из них движутся с гораздо большей скоростью, достигающей в начале пути $\frac{1}{3}$ скорости света. Ныне известно, что скорость некоторых из них не уступает скорости света.

Однако Беккерель почти сразу обнаружил, что своим происхождением эти лучи вовсе не обязаны флюоресценции, поскольку в темноте действие протекало так же, как и при солнечном свете. Именно поэтому его исследование можно считать величайшим открытием всех времен. На рис. 19 воспроизведена подлинная урановая радиография, полученная Беккерелем. Для ее получения фотографическая пластинка в светонепроницаемой оболочке в течение нескольких дней подвергалась воздействию излучения, исходящего от микроскопического следа окиси урана через алюминиевый медальон. Более тонкие части медальона защищали фотопластинку в меньшей степени, чем более толстые, и поэтому голова фигуры проявилась на радиографии. То, чего Круксу, Ленарду и Рентгену удавалось добиться только с помощью самых последних достижений в области электричества высокого напряжения и техники высокого вакуума, элемент уран совершал сам по себе, действуя к тому же намного мощнее, о чем свидетельствует гораздо более высокая скорость излучения. Конечно, вся важность этого откры-

один из соотечественников ученого во вступительном слове к истории этого предмета). Что же касается радиоактивности, то ее без сомнения можно считать наукой французского происхождения, основанной Беккерелем. Это открытие было сделано в 1896 г., в период между открытием рентгеновского излучения и электрона, однако именно оно проложило путь в новый мир. Поначалу оно вызвало не более чем любопытство и, несомненно, на более ранней стадии развития науки долго бы оставалось в таком качестве. Работая в области поиска рентгеновского излучения при флюоресценции и флюоресценции (предмет исследования его отца и деда), Беккерель, к счастью, имел возможность использовать некоторые из флюоресцирующих

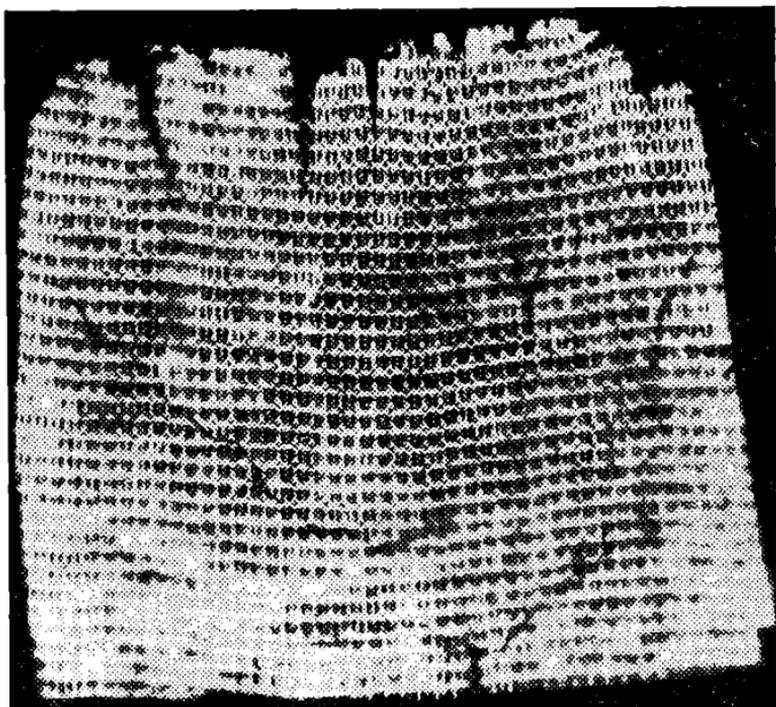


Рис. 20. Фотографический отпечаток газокалильной сетки Вельсбаха, сделанный в излучении, испускаемом самой сеткой

тия была оценена не сразу. Одна из причин заключается в том, что получаемый эффект крайне незначителен, и, для того чтобы получить хотя бы самое слабое изображение, фотопленку необходимо подвергать действию излучения в течение длительного времени, хотя вскоре положение изменилось. Однако еще в начале нашего века Кельвин, например, придерживался другой точки зрения, считая, что радиоактивные вещества могут являться преобразователями некоего ранее неизвестного вида внешней энергии, а не самостоятельными источниками энергии. Как известно, новый этап исследований был открыт работами супругов Кюри, но начат он был Марией Кюри еще до замужества*, когда она, польская студентка Склодовская, изучала химию в Сорбонне.

* Неточность Содди: М. Кюри принялась за изучение радиоактивности после замужества. — *Прим. ред.*

М. Кюри начала свои исследования с терпеливого изучения максимально возможного числа остальных элементов (80 или более), с тем чтобы определить, не являются ли некоторые из них, подобно урану, радиоактивными. Она обнаружила, что один из них, а именно торий, обладает такой же слабой радиоактивностью, как и уран. Одновременно с нею это важное открытие сделал и немецкий исследователь Г. Шмидт. Знаменательно то, что периодическая система химических элементов, составленная на основе их атомных масс, заканчивается ураном, торий же предшествовал ему (в то время между этими двумя элементами оставалась одна свободная клетка). Таким образом, уран и торий обладали самыми тяжелыми из известных тогда атомов. Радиоактивные свойства тория проиллюстрированы на рис. 20, на котором изображен отпечаток газокалильной сетки Вельсбаха, полученный в результате действия лучей, испускаемых торием, входящим в состав сетки. После того как сетку изготовили и спрессовали, она была прокалена, помещена на светочувствительную сторону фотографической пластинки, покрытую не пропускающим свет листом алюминия, и оставлена на несколько недель в темноте. Данная иллюстрация является фотографией негатива, полученного таким образом, и показывает, как торий дал изображение сетки при помощи испускаемых им лучей. Однако отправным моментом для последовавших за этим удивительных открытий явилось установление того, что урановая смолка, как и все другие природные минералы, содержащие уран, в несколько раз радиоактивнее самого урана. Именно это наблюдение в дальнейшем и позволило супругам Кюри открыть новые, исключительно радиоактивные элементы — полоний, радий и актиний, причем последний из них был открыт совместно с А. Дебьерном.

Новые радиоактивные элементы

Первое сообщение об открытии радия было сделано в 1898 г. Барий, выделенный из урановой смолки путем обычного химического анализа, обладал относительно сильной радиоактивностью, а при выделении хлорида бария из водного раствора в кристаллическом виде радиоактивность покидала материнский раствор и концентрировалась в кристаллах. К концу того же года было обнаружено, что образец, переданный Э. Демарсе для спектроскопического анализа, дает неизвестную ранее полосу в ультрафиолетовой области спектра, что подтверждало присутствие нового элемента. А далее, для того чтобы полностью отделить радий от бария, требовалась только систематическая фракционированная кристаллизация хлорида бария, сначала из воды, а затем, по мере сокращения количества вещества, из слабого раствора соляной кислоты, в которой хлорид растворяется в меньшей степени. Позднее

Гизель установил, что этот процесс протекает быстрее не в хлориде, а в бромиде. Так удалось получить мельчайшие дозы чистого хлорида радия. По мере фракционирования появлялся совершенно новый спектр, состоящий из десятка и более линий значительной интенсивности, в то время как спектр бария постепенно исчезал, сохраняя только след от самой сильной своей линии.

Что касается двух других новых радиоактивных элементов, то полоний был открыт раньше радия и назван в честь родины М. Кюри. Он концентрируется в процессе химического анализа с висмутом. Впоследствии было установлено, что его радиоактивность не носит постоянного характера, а исчезает полностью в течение нескольких лет. Актиний концентрируется с редкоземельными элементами, содержащимися в минералах. Согласно последним данным, его полный распад характеризуется периодом от одного до двух веков. Как полоний, так и актиний содержатся в минералах в неизмеримо малых количествах, и, хотя они могут бесконечно возобновляться за счет сопровождающих элементов, их невозможно, подобно радю, выделить в чистом виде. Особенность радиоактивности полония заключается в том, что она состоит всего лишь из одного вида слабопроникающего излучения, которое мы теперь называем α -частицами и о котором будет подробно рассказано позднее.

Появление спектроскопа почти сразу же привело к открытию нескольких новых элементов, содержащихся в крайне незначительных дозах в природных ископаемых, поскольку спектр был той меткой, которая позволяла в ходе химического разделения следить за процессом концентрирования данного элемента. То же самое произошло и с новыми радиоактивными элементами. Следует отметить тот факт, что, используя радиоактивность в качестве опознавательной метки, М. Кюри практически полностью определила химические свойства радия и его место в периодической системе (как тяжелого аналога бария) задолго до выделения этого элемента в количестве, достаточном даже для демонстрации его характерного спектра, не говоря уже о получении поддающегося взвешиванию количества. А спектры полония и актиния так до сих пор и не удалось получить*. В наши дни радиоактивные разновидности, или изотопы, всех известных элементов можно получить искусственным путем примерно в таких же неизмеримо малых количествах. Это привело к появлению подобного метода, заключающегося в использовании радиоактивных нуклидов в качестве *меченых атомов*, т. е. предназначенных для наблюдения за поведением обычных элементов, с которыми они химически идентичны. Этот метод все больше входит в моду в таких далеких от физики областях, как биология, где он используется для наблюдения за обменом веществ в живом организме.

* Оптические спектры этих элементов измерены в 50-х гг. — Прим. ред.

После того как наконец удалось выделить соли радия в чистом виде, было установлено, что они в миллионы раз радиоактивнее урана (при одинаковом массовом соотношении) и дают сильный флюоресцентный, фотографический и ионизирующий эффекты. С помощью чистых препаратов было установлено, что атомная масса радия равна 226. Эта работа потребовала, однако, крупномасштабных заводских операций с использованием нескольких тонн урановой смолки и, естественно, заняла много времени, поскольку содержание радия в минералах относится к содержанию в них урана как 3:1 000 000. Выделение энергии было калориметрически измерено только в 1903 г., и по тогдашним подсчетам было принято за 100 или более калорий на 1 г вещества в 1 ч (позднее было получено точное значение — 135 кал). Таким образом, менее чем за два дня радий спонтанно выделяет энергии больше, чем получается при самых активных из всех известных химических реакциях — сгорании и взрыве (при одинаковом массовом соотношении). Как мы теперь знаем, с течением времени норма выделения энергии будет медленно сокращаться, но даже в том случае, если она останется на первоначальном уровне, этот процесс продлится 2300 лет. Общий же выход энергии в миллион раз превышает выход энергии равного по массе горючего или взрывчатого вещества. На рис. 21 изображено «радиевое письмо». Это позитивное изображение с негатива фотографической пластинки, вложенной в светонепроницаемый конверт, по которой, как карандашом, писали трубочкой, содержащей несколько миллиграммов препарата радия. Результат, который мы видим, был достигнут в основном благодаря β -излучению.

Однако, какое бы эпохальное значение ни имело открытие радия, основной вклад М. Кюри в развитие науки заключается, вероятно, не в этом. Наиболее важен тот основополагающий принцип ее исследований, к которому она пришла еще на ранней стадии своей работы и от которого не отступала даже перед лицом всех очевидных трудностей. Суть этого принципа состояла в том, что радиоактивность, как и спектр, является свойством атома. Но радиоактивность присуща только атому и не зависит от его химического соединения с другими атомами при образовании молекул; она также абсолютно не была подвержена влиянию со стороны каких-либо известных в то время факторов, независимо от их количества или качества. Можно сказать, что между радиоактивностью и астрономией фактически существует некоторое сходство, заключающееся в том, что исследователь выступает или, вернее, выступал в роли простого наблюдателя, хотя вначале так не казалось. Однако, чем больше это явление изучалось, тем яснее становилось, что радиоактивность непостоянна, как ветер.

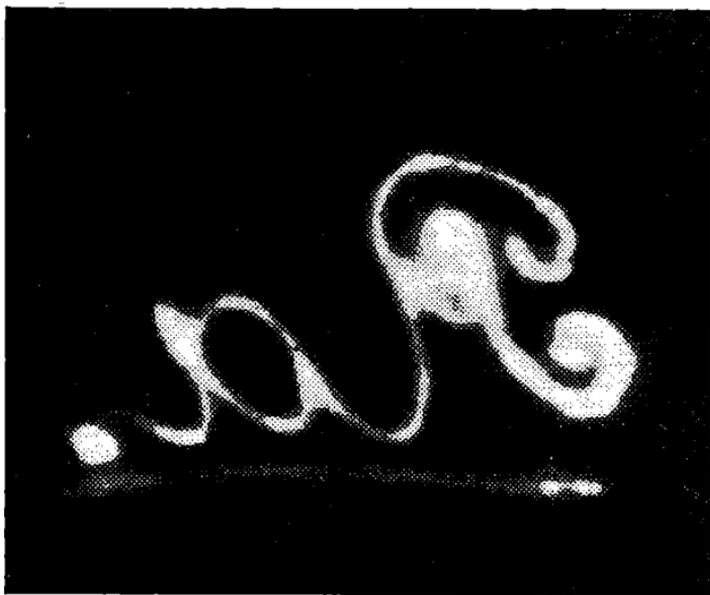


Рис. 21. «Радиевое письмо»

Ионизация газов

Теперь нам придется обратиться к ранним работам Эрнеста Резерфорда, который ко времени, описываемому в данном разделе, т. е. к 1895 г., только что закончил Кентербери-колледж в новозеландском городе Крайстчерче и стажировался у Дж. Дж. Томсона в Кембридже. Одно из их исследований имело целью установить электрический эффект, вызываемый рентгеновским излучением и излучением радиоактивных веществ, а именно выяснить их способность ионизировать газы. Эти эффекты проиллюстрированы на рис. 22 и 23. На рис. 22 показан электроскоп сэра Джеймса Маккензи Дэвидсона, представляющий собой шелковую кисточку, которая заряжается путем поглаживания основания теплым сухим кистетом. Электроскоп моментально разряжается (см. рис. 23), как только воздух ионизируется рентгеновским излучением или находящимся где-нибудь по соседству радием. Последовавший за этим быстрый прогресс во многом произошел благодаря созданию Томсоном и Резерфордом теории этого процесса (1897—1899), которую стало возможным применять для точного измерения интенсивности излучения, а следовательно, и радиоактивности. Само же

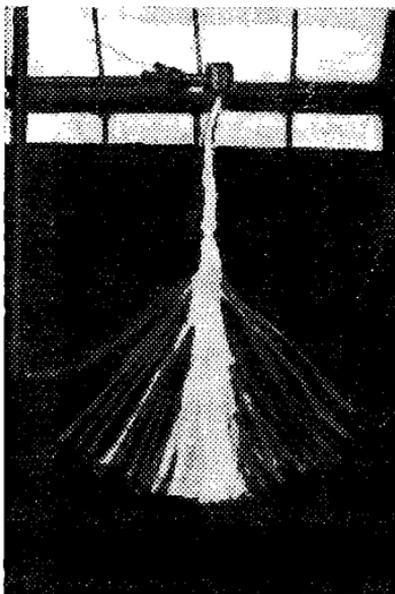


Рис. 22. Электроскоп в виде шелковой кисточки в заряженном состоянии

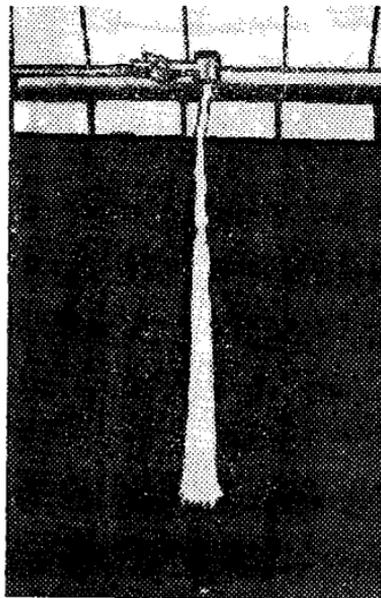


Рис. 23. Электроскоп, разряженный с помощью капсулы с радием

явление ионизации было открыто еще Беккерелем почти одновременно с открытием фотографического действия лучей, хотя, прежде чем эта теория была понята, ему пришлось в течение двух лет провести большой объем исследований.

Воздух, например, обычно является изолятором, но, если на него воздействовать этими новыми лучами, он временно становится проводником (хотя и до определенных пределов). Томсон и Резерфорд показали, что этот эффект очень похож на процесс электролиза в жидкости, на основании которого Фарадей назвал ионами положительно и отрицательно заряженные молекулы. Разница заключается в том, что в газах эти ионы образуются под воздействием излучения, а в жидкостях, проводящих электрический ток, они уже существуют в готовом виде. При ионизации газов ионы образуются путем поглощения выделяющейся при ионизации энергии, но, как только воздействие на них прекращается, они рекомбинируют и исчезают. В связи с этим процесс ионизации не подчиняется закону Ома, который применим к металлическим проводникам и, в

измененном виде, к электролизу жидкостей. Вначале, как и по закону Ома, ток увеличивается по мере увеличения напряжения, однако затем увеличение замедляется, и, наконец, ток достигает своего максимального значения (так называемый ток насыщения). Это происходит потому, что число ионов ограничено и для тока насыщения вполне достаточно существующего напряжения, чтобы заставить ионы двигаться к электродам со скоростью, при которой потери на рекомбинацию в расчет можно не принимать.

Альфа-, бета- и гамма-излучение

Теория ионизации явилась сама по себе значительным продвижением науки вперед, но гораздо важнее ее бесценное значение для практики, поскольку она позволила дополнить фотографический метод чрезвычайно точными электрическими методами обнаружения и измерения этих новых видов излучения. Первый результат применения электрического метода обнаружения и измерения, не получивший поначалу должного признания, со временем был оценен во всем его величии. Резерфорд доказал, что, помимо проникающего излучения, проходящего через тонкую металлическую пластинку, уран испускает излучение, обладающее относительно слабой проникающей способностью, которое, однако, играет намного более важную роль в процессе ионизации. Это излучение он назвал α -излучением, чтобы отличить его от открытого им же β -излучения, которое, как уже упоминалось, является излучаемыми электронами, подобными катодным лучам; впоследствии было доказано, что от них почти полностью зависит производимый ураном фотографический эффект. К тому же в руках Резерфорда α -излучение превратилось в ключ, с помощью которого была впервые высвобождена атомная энергия, хотя и в пределах всего лишь одного атома (большего не удавалось достичь еще в течение долгого времени после смерти ученого). Поистине никто другой не обладал подобным гением экспериментатора, чтобы сделать такое открытие.

Однако, прежде чем перейти к дальнейшему рассмотрению свойств этого излучения, для полноты представления необходимо отметить третий вид излучения — γ -излучение. Оно было открыто в 1900 г. Вийяром после того, как появились активные препараты радия, а впоследствии было обнаружено, что его также испускают уран, торий и большинство радиоактивных элементов, открытых позднее. Излучение отличала большая проникающая способность (в те времена казавшаяся просто поразительной), однако оно не отклонялось под воздействием магнитного поля. Для того чтобы снизить интенсивность γ -излучения радия наполовину, требуется свинцовая пластинка толщиной в 1,25 см, и все же его легко можно обнаружить на расстоянии более 30 см. Однако эту необычайную особенность затмило трудно уловимое излучение, при-

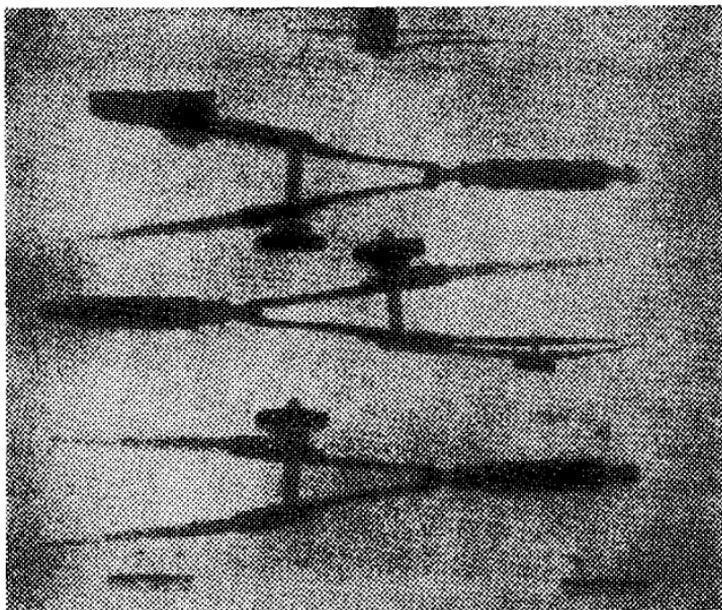


Рис. 24. Рентгенограмма готовальни, сделанная в γ -излучении радия

ходящее на Землю из космического пространства, причем проникающая способность его иногда была, видимо, в тысячи раз больше, чем для излучения радия. Как и рентгеновское излучение, γ -излучение является видом световой радиации, но имеет чрезвычайно малую длину волны. Оно находится примерно в таком же отношении к β -излучению, как рентгеновское излучение относится к катодному. Несмотря на огромный практический интерес, который они представляют благодаря своей большой проникающей способности, им не придавалось, по крайней мере на первых порах, такого теоретического значения, как двум другим видам излучения. При достаточной активности препарата все три вида излучения производят, как и рентгеновское, отличный флуоресцентный эффект. Для того чтобы наблюдать свечение, вызванное рентгеновским, β - и γ -излучением, лучше всего использовать платиноцианид бария (или виллемит) и силикат цинка, а для α -излучения — гексагональную модификацию цинковой обманки (один из видов сульфида цинка) или же алмазную пыль. В наше время все три

эффекта — фотографический, электрический и флюоресцентный — объясняются одной и той же причиной, а именно — процессом ионизации (описанным нами применительно к электрическому эффекту). На рис. 24 изображена рентгенограмма готовальни, сделанная в γ -излучении радия и демонстрирующая его исключительную проникающую способность. Даже металлические натяжные болты, которые мы видим изображенными в профиль, отбрасывают только относительно светлые тени.

Эманация и активные осадки

В 1898 г. Резерфорд стал профессором физики в университете Мак-Гилла в Монреале, где он работал до 1907 г. Здесь он заложил основы своих работ в области радиоактивности, ставших главными в его жизни. В начале 1900 г. он сообщил о сделанном им открытии, которому, как оказалось, было суждено в течение трех лет развеять тайну спонтанного испускания энергии радиоактивными веществами.

Все началось с того момента, когда работавший вместе с Резерфордом профессор электротехники Р. Б. Оуэнс заметил, что радиоактивность тория очень чувствительна к сквознякам! Оуэнс объяснил это тем, что соединения тория (в отличие от соединений урана) испускают, помимо прямолинейно распространяющегося излучения, радиоактивную *эманацию*, или пары. Она задерживается тончайшей пленкой воздухо непроницаемого вещества, однако свободно проникает сквозь пористые преграды, такие, как бумага или картон. Поэтому, для того чтобы выделить эманацию из соединения тория, не нужно никаких химических реакций, а вполне достаточно легкого дуновения ветра. После выделения таким образом эманации, ее радиоактивность, состоящая только из α -излучения, быстро и безостановочно ослабевает в геометрической прогрессии, спадая через минуту с момента начала процесса в два раза и становясь ничтожно малой через 10 мин. На рис. 25 схематически изображен прибор, который использовал Резерфорд для проведения этих экспериментов. Соединение тория помещается в трубку *C*. Из газометра в контрольный цилиндр (справа) пропускается поток сухого воздуха, проходящий на своем пути через трубку *C* и следующую за ней колбу *D*, в которой находится стеклолота для удаления ионов, первоначально содержащихся в воздухе. Три электрода контрольного цилиндра (*E*, *F*, *H*) обычно соединены друг с другом и с двумя секторами электрометра, а другие два сектора заземлены. Оболочка цилиндра соединена с одним из полюсов батареи высокого напряжения, а другой полюс заземлен. С помощью такого прибора измеряется ионизация, происходящая в контрольном цилиндре под воздействием эманации тория. А если

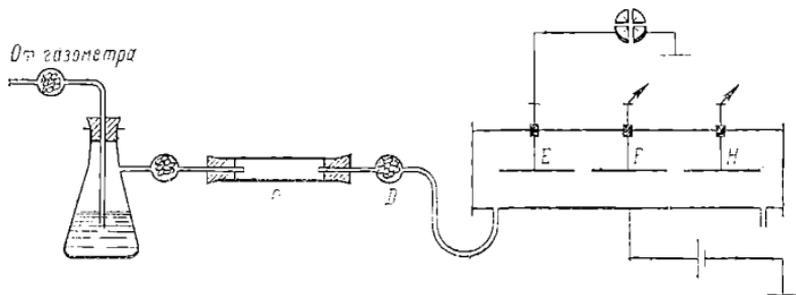


Рис. 25. Прибор Резерфорда для регистрации эманации тория

измерить по отдельности ток ионизации на трех электродах, то можно определить скорость распада эманации.

Другое свойство эманации заключается в том, что на всех контактирующих с ней поверхностях со временем образуется, по выражению Резерфорда, *возбужденная активность*, ныне называемая *активным осадком*. Эта активность испускает все три вида излучения.

Возбужденная активность вела себя так, как если бы она была невидимым налетом сильно радиоактивного вещества, которое можно стереть наждачной бумагой и которое растворяется в кислотах (в некоторых лучше, чем в других), причем при выпаривании раствора оно может быть вновь получено в первоначальном состоянии. Этот налет также обладает только временной радиоактивностью, которая, однако, сохраняется дольше, чем эманация, полностью исчезая лишь через два дня после отделения последней. Когда на пути эманации попадают положительно и отрицательно заряженные поверхности, активный осадок почти полностью остается на последних. Таким образом, если в роли отрицательно заряженной поверхности выступит, например, острие иглы, то можно легко получить очень концентрированный источник излучения.

Примерно в это же время супруги Кюри обнаружили, что соединения радия обладают сходным свойством: вызывать в помещенных рядом с ними вещества явление, названное французскими исследователями *наведенной радиоактивностью*. Поскольку соответствующая эманация радия, ныне известная как радон, в то время не была еще открыта, европейские ученые, естественно, считали, что их наведенная радиоактивность вызывалась излучением радия, как, например, фосфоресценция. Однако Резерфорд твердо был уверен, что его возбужденная активность вызывалась эманацией тория, а не являлась непосредственным эффектом излучения тория. В то время спор об этих терминах, хотя и неосознанно, являлся решающим вопросом. Происходили ли описанные выше яв-

ления по причине наведения или генерирования новых продуктов, объяснялись ли они возбуждением или трансмутацией? Ведь если эманация и активный осадок безостановочно генерируются из тория, то, поскольку радиоактивность является свойством атома, речь идет о трансмутации. С другой стороны, как первоначально считалось во Франции, это явление можно было объяснить, предположив, что радиоактивные вещества способны неким неизвестным образом вызывать временную радиоактивность в находящихся рядом с ними веществах. Впоследствии было установлено, что не только торий, но также радий и актиний выделяют как эманации, так и активные осадки, различающиеся своими периодами полураспада (т. е. временем, за которое активность сокращается в два раза). Так, период полураспада эманации радия равен 4 дням, а эманации актиния — нескольким секундам. Распад активных осадков происходит более сложно, но в целом период полураспада для активных осадков тория составляет 11 часов, радия — около получаса, а актиния — немногим более получаса. Таким образом, было установлено, что во всех трех случаях это явление протекало аналогично.

Глава пятая. ОТКРЫТИЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Весной 1900 г. автор этих строк, за два года до этого кончивший Оксфордский университет, находился в Канаде, тщетно пытаясь получить профессорскую кафедру. Больше всего его привлекала замечательная лаборатория Макдональда в университете Мак-Гилла, и он остался работать там в качестве демонстратора на химическом факультете. В это время Резерфорд находился в Новой Зеландии — он справлял там свою свадьбу. Когда, вернувшись в Монреаль, он рассказал об обнаружении им эманации тория, автор решил прекратить начатые им химические работы и, воспользовавшись приглашением Резерфорда, занялся совместно с ним исследованием физических и химических свойств радиоактивных соединений тория. Это исследование продолжалось более двух лет и под конец охватило все радиоэлементы.

Что же представляли собой с химической точки зрения эти газообразные эманации, отделявшиеся уже при легком дуновении воздуха и доступные исследованию благодаря своему излучению, даже если они содержались в неизмеримо малых дозах? Естественно, любой химик задался бы таким вопросом, и поэтому, когда зимой 1900 г. автор начал совместные с Резерфордом исследования, он в первую очередь приступил к решению этой задачи. К счастью, ответ удалось найти очень быстро: он оказался отрица-

тельным в том смысле, что радиоактивные эманации совершенно не обладают химическими свойствами: они могут проходить через любые химические реагенты без потерь и подвергаться, несколько при этом не изменяясь, всем известным химическим методам поглощения газов.

Эманация — это инертный газ

Начнем наш рассказ с 1895 г., хотя его следовало бы начать с 1894 г., когда ныне покойные лорд Рэлей и сэр Вильям Рамзай обнаружили аргон, вложив в его название примерно следующий смысл: «Что хочешь ты, весь день слоняясь праздно?» Однако в 1894 г. это открытие еще ничего бы не значило. Да и позднее последовал лишь один вывод, а именно — эманации являются аргоновыми инертными газами. Эта точка зрения окончательно утвердилась в начале 1901 г., когда уже было известно, что инертные элементы воздуха составляют абсолютно новую нулевую группу газов в периодической системе, так как все лишены способности образовывать химические соединения с другими элементами. Первоначально в нулевую группу вошли (по мере возрастания атомной массы) гелий, неон, аргон, криптон, ксенон, а затем были включены и три изотопные эманации — радон, торон и актинон, которые следуют за ксеноном в группе с нулевой валентностью, подобно тому как в группе двухвалентных щелочноземельных элементов радий следует за барием. Для продолжения этих исследований щедрый основатель лаборатории университета Мак-Гилла миллионер Макдональд снабдил физическую лабораторию установкой для получения жидкого воздуха. И как только установка была запущена, удалось обнаружить, что при температуре от -150° до -155°C эманации полностью конденсируются жидким воздухом, хотя еще при температуре -100°C они не претерпевают никаких изменений. Это свойство позволяет сравнительно легко получать радон в чистом виде, и, как выяснилось в дальнейшем, оно оказалось бесценным для последующего развития теории и практики.

Торий-Х и уран-Х

Задолго до открытия упомянутого выше свойства эманаций ученым удалось установить нечто более важное, чем инертный химический характер незримого торона. Было обнаружено, что он является непосредственным продуктом не самого тория, а некоей промежуточной субстанции, названной нами торием-Х. Выяснилось, что период полураспада тория-Х равен четырем дням, что вполне достаточно для того, чтобы экспериментатор мог быстро, но без

спешки получить результаты. Торий-Х, который, как нам теперь известно, является изотопом радия, был отделен от тория путем простого осаждения из раствора аммиаком. Именно постепенное восстановление активности тория, из которого выделили торий-Х, а также другие многочисленные аналогичные явления позволили решительно противопоставить идею генерирования новых продуктов идее наведенной радиоактивности.

Вот один такой пример, заслуживающий особого внимания. В 1900 г. В. Круксу несколькими простыми и элегантными химическими способами удалось выделить из урана один из его радиоактивных компонентов, который он назвал ураном-Х; позднее по аналогии с ним и появилось название торий-Х. Ученый считал, что наличием урана-Х объясняется радиоактивность всего урана, хотя уран-Х содержится в нем в минимальном количестве. Беккерель, действуя подобным образом, т. е. многократно осаждавая сульфат бария из раствора урана, получил следующий результат: радиоактивность урана уменьшилась, а соль бария становилась радиоактивной.

Повторяя этот опыт, автор, сначала пытаясь использовать резерфордские методы измерения ионизации, ни одним из химических способов не достиг отделения радиоактивности от урана или ее уменьшения. Затем был испробован фотометод регистрации излучения и тогда были получены те же результаты, что и у Крукса, пользовавшегося только этим методом. Отсюда вытекало, что фотографический эффект урана полностью обязан своим происхождением β -излучению. До сих пор ни один из известных нам химических процессов был не в состоянии даже ненамного уменьшить α -излучение урана.

Как Крукс, так и Беккерель пришли к выводу, что уран, терявший в процессе химической обработки свою активность (измеряемую фотометодом), со временем ее восстанавливает. Что же касается выделенного урана-Х, то он, в свою очередь, полностью утрачивает свою активность. То же самое наблюдалось и после выделения из тория тория-Х. Основываясь на своих опытах, Беккерель сделал вывод, что активность соли бария является наведенной (или «ложной») радиоактивностью, возникающей благодаря близости с ураном; однако восстановление и распад протекают в данном случае намного медленнее и занимают вместо одного месяца девять. Установление длительности периода полного восстановления и распада, равно как и отвергнутая ныне гипотеза наведенной радиоактивности, способствовали появлению правильного объяснения рассматриваемого нами явления, причем следует отметить, что сначала таким образом был объяснен более сложный случай с торием, а уж затем — более очевидный случай с ураном (рис. 26 и 27). С другой стороны, после того как удалось нащупать правильный путь исследований, уже ставший известным сложный процесс распада тория обеспечил большое разнообразие примеров,

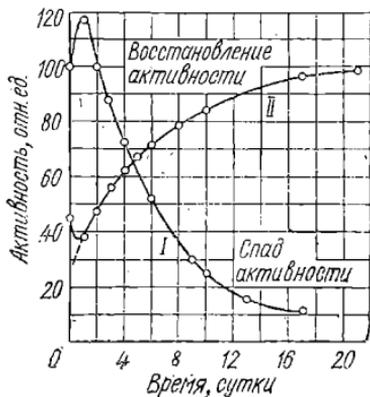
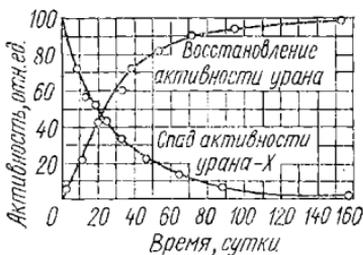


Рис. 26. Кривые распада и восстановления тория-Х и тория (α -излучение)

Рис. 27. Кривые распада и восстановления урана-Х и урана (β -излучение)

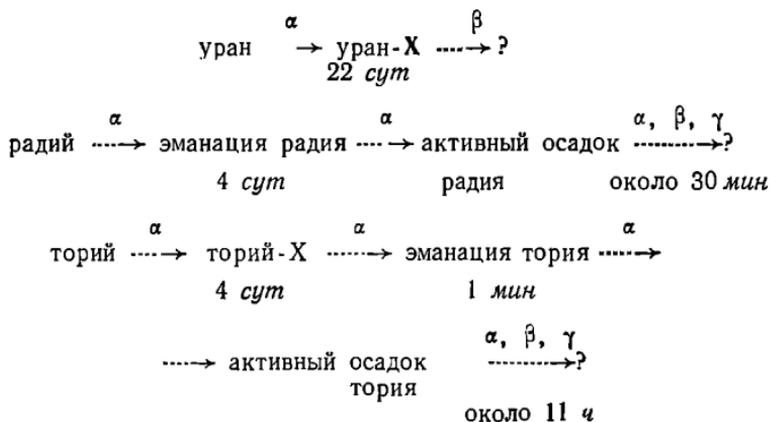


с помощью которых удалось создать и проверить на решающих экспериментах принципиально новую теорию, постулирующую наличие естественной трансмутации у двух элементов, имеющих самые тяжелые атомы.

Хорошей иллюстрацией сказанному является график, изображающий кривые спада и восстановления. На рис. 26 показаны кривые спада и восстановления активности тория-Х и тория (α -излучение). Кривая I — экспонента спада активности тория-Х, а кривая II — экспонента восстановления активности тория по прошествии некоторого времени с момента его выделения. Из этого графика видно, что, перед тем как стать неактивным, торий-Х (кривая I) в первые сутки выделяет активный осадок; одновременно происходит распад активного осадка в тории (кривая II) в отсутствие материнского тория-Х. Кроме того, кривая восстановления при экстраполяции назад пересекает нулевую ось примерно на уровне 25% конечной активности, что происходит за счет α -активности самого тория, не отделимой никакими известными нам процессами. На рис. 27 соответственно изображены кривые урана-Х и урана (β -излучение), свидетельствующие о том, что распад и восстановление протекают с самого начала, так как в случае с ураном отсутствует активный осадок или какой-либо иной обнаруживающий себя опытным путем последующий продукт. Исходя из этого, можно сделать вывод, что β -излучение позволяет прямо измерять количества урана-Х.

Так впервые появилась теория Резерфорда и Содди, согласно которой радиоактивность является следствием атомного распада, причем атомы радиоактивного вещества, испуская излучение, состоящее из заряженных частиц, превращаются в более легкие атомы

другого элемента. В то время радиоактивные ряды урана, радия и тория выглядели следующим образом:



Над стрелками показан вид частиц, испускаемых в процессе этого превращения, а под стрелками даны периоды полураспада. Последовавшие за этим опыты многих ученых подтвердили правильность данной гипотезы, и к 1902 г. теория радиоактивного распада в основном была сформирована.

С течением времени было установлено, что все элементы, обладающие естественной радиоактивностью, можно отнести к одному из трех длинных радиоактивных рядов. Два ряда начинаются с урана, причем один из них включает в себя радий и полоний, а самым известным из промежуточных членов второго уранового ряда является актиний. Третий ряд начинается с тория. Первый ряд включает 14, второй — 10, а третий — 11 последовательных, весьма похожих друг на друга превращений.

Теория радиоактивного распада

Как уже говорилось в предыдущем разделе, радиоактивность представляет собой естественный процесс, и вплоть до конца 30-х годов нашего века ученым не было известно ни одного средства, с помощью которого можно было бы вмешаться и воздействовать на этот процесс. Суммарная радиоактивность всегда постоянна, а легкие изменения, вызываемые физическими или химическими средствами, достигаются за счет нарушения баланса многочисленных продуктов распада. Независимо от того, выделяются эти продукты или нет, радиоактивный процесс продолжается без каких-либо изменений.

Следует отметить, что закон превращений одинаков для всех радиоэлементов, являясь очень простым и в то же время практически необъяснимым. Этот закон имеет вероятностную природу. Его можно представить в виде духа разрушения, который в каждый данный момент наугад расщепляет определенное количество существующих атомов, не заботясь об отборе тех из них, которые близки к своему распаду. Эта доля атомов называется постоянной распада и обычно обозначается символом λ . Она пропорциональна единице времени, к которой относится; однако без предварительной оговорки за единицу времени следует принимать одну секунду. Так, при количестве атомов, равном N , в одну секунду распадается λN (величина λ имеет характерное значение для каждого вида распадающихся атомов). Это предполагает, что λ настолько мала, что за секунду количество атомов радиоактивного вещества практически не изменяется; в большинстве случаев это соответствует действительности. Тогда среднее время жизни атомов, выраженное в секундах, обратно пропорционально постоянной распада, т. е. $1/\lambda$. За этот период количество атомов уменьшается в e раз, где e — основание натурального логарифма (2,718). Среднее время жизни составляет 1,445 периода полураспада. Оба эти понятия широко используются.

Хотя среднее время жизни любого радиоактивного атома является определенной и неизменяемой природной константой, продолжительность его фактической жизни определить невозможно. В частности, среднее время не уменьшается с возрастом, являясь одинаковым как для любого набора только что родившихся атомов, так и для «старого» атома, сколько бы он уже ни существовал. Этот простой закон не поддается объяснению и в наши дни. Он был хорошо известен по наблюдениям за химическими превращениями еще до открытия явления радиоактивного распада, но в обычной химии он в большинстве случаев, если не всегда, объяснялся другими, вполне понятными причинами.

Гелий и радиоактивность

Теперь обратимся к открытию, которое в буквальном смысле пришло к нам на Землю с небес. В 1868 г. Локьер обнаружил в солнечном спектре полосу, известную как D_3 , очень близкую к желтому дублету D_1, D_2 , испускаемому натрием. Эта полоса не соответствовала ни одному из известных земных элементов, и Локьер смело назвал вызывающий ее солнечный элемент *гелием*. Как только был открыт аргон, профессор Майерс, минералог из Оксфорда, связался с Рамзаем, который в то время исследовал возможность получения соединений аргона с другими элементами. Майерс высказал Рамзаю предположение с том, что аргоном в действительности может являться газ, обнаруженный американским химиком-мине-

ралогом Гиллебрандом в ураните (первичном минерале, вторичной разновидностью которого является урановая смолка) и отождествленный им на основании химического анализа с азотом. Но этот газ оказался гелием! Было установлено, что атомная масса гелия равна 4 (по отношению к кислороду, атомная масса которого равна 16) и что из известных элементов легче гелия лишь водород (1,008).

Попытки получить химические соединения аргона и других инертных газов атмосферы (по мере их открытия) по-прежнему не приносили успеха, и у ученых возник вопрос: так какое же место занимает среди них гелий? Рамзай и Траверс заметили, что гелий попадался только в минералах, содержащих уран и редкоземельные элементы, причем в числе последних, как правило, находился также и торий. Несколько позднее на Цейлоне был найден новый минерал — торрианит, в состав которого входили торий и уран. Выяснилось, что 1 г торрианита содержит также до 10 см³ гелия. Плотность этого минерала в девять раз превышает плотность воды, и, таким образом, если исходить из того, что гелий химически не соединен с другими элементами минерала, то придется предположить, что для удержания его в занимаемом им объеме необходимо давление до 90 атм, даже если бы сам минерал уже не заполнял пространство. Подобные несложные рассуждения позволили выдвинуть предположение о том, что гелий, вероятно, является одним из конечных продуктов распада урана и тория.

Таким образом, и отрицательные результаты иногда бывают полезны!

Возраст Земли

Через несколько лет, проводя подобные исследования, американский химик Б. Болтвуд сумел по составу и геологическому возрасту минералов, содержащих уран и торий, правильно определить, что другим конечным продуктом распада урана является свинец и что радий и актиний также являются продуктами распада урана. Наоборот, отношение урана или тория к свинцу или гелию, содержащимся в минералах, является в наши дни настоящими «геологическими часами», позволившими непосредственно определить возраст этих минералов. Таким образом, удалось установить, что некоторые из них постоянно существуют уже в течение 1,8 миллиарда лет. При этом мы, конечно, исходим из предположения, что на протяжении всего периода «часы» показывали время равномерно. Покойный профессор Дублинского университета Джолли, которому, как и ныне здравствующему лорду Рэлею*, мы обязаны этим интересным исследованием, считал приведенную выше цифру

* Имеется в виду сын знаменитого физика лорда Рэля. — *Прим. ред.*

слишком завышенной. По его мнению, раньше «часы» шли быстрее, чем сейчас. Исследования, проведенные уже после смерти Джолли, подтвердили его правоту, хотя последние данные показывают, что необходимо внести лишь небольшую поправку, которая существенно не влияет на определенный ранее возраст Земли.

Альфа-излучение

Вернемся теперь к α -излучению. Сперва его считали очень «мягкой» (т. е. непроникающей) разновидностью рентгеновского излучения. Однако в скором времени эта догадка уступила место другому, поистине поразительному предположению, впервые выдвинутому в 1900 г. М. Кюри применительно к излучению полония. М. Кюри предположила, что излучение полония в действительности представляет собой испускаемые частицы вещества, подобно тому как β -излучение является испускаемыми отрицательными электронами, которые движутся со скоростью, близкой к скорости света. Этим объясняется как неизмеримо большая энергия, так и слабая проникающая способность α -излучения. Более того, уже в то время общие закономерности взаимосвязи электричества и материи были достаточно хорошо известны для того, чтобы лорд Рэлей в 1901 г. и В. Крукс в 1902 г. смогли сделать заключение, что если предположение М. Кюри соответствует действительности, то α -излучение должно нести положительный заряд. Выражаясь современным языком, ученые начала века рассматривали α -излучение как «ионы», или атомы, вещества, из которых один или несколько отрицательно заряженных электронов были «выбиты» в процессе их испускания или последующего столкновения с другими атомами, попадающими на их пути. Катодные лучи и β -излучение было сравнительно нетрудно отождествить с отрицательными электронами, которые, будучи очень легкими, послушно изменяют свою траекторию при воздействии на них умеренным магнитным или слабым электрическим полем, хотя в последнем случае необходимо создать практически полный вакуум для того, чтобы избежать вызываемого ионизацией эффекта экранирования, сбивавшего с толку первых исследователей этого явления.

Будучи талантливым экспериментатором, Резерфорд превратил изучение α -частиц, им же и открытых, в персональный объект исследования. Однако окончательное установление опытным путем их действительной природы отняло у него несколько лет напряженного труда. Ведь атом в тысячи раз тяжелее электрона, и примерно во столько же раз труднее добиться его отклонения. Сложность состояла не только в необходимости создания мощного электромагнита, но и в самой слабости проникающей способности α -излучения; кроме того, Резерфорду пришлось дожидаться, когда будет готов препарат радия, достаточно активный для проведения опы-

та. Но к 1902 г. он добился успеха. Используя методы регистрации ионизации, ему удалось доказать, что магнитное поле отклоняет траекторию α -частиц, которые следуют по дуге с радиусом, от 50 до 100 раз большим, чем радиус дуги катодных лучей. С другой стороны, опыты Резерфорда показали, что α -частицы заряжены положительно, а их масса с некоторым допущением по крайней мере того же порядка, что и масса атома водорода. Этот вывод был сразу же подтвержден Беккерелем, который пользовался фотографическим методом и которому удалось получить более активный препарат радия. В 1903 г. Резерфорд и де Кудр успешно распространили этот вывод на отклонение в электрическом поле: достигнутые ими результаты показывали, что, если α -частица несет один положительный заряд, ее масса составляет приблизительно 1,6 массы атома водорода. Из этого следовало, что α -частицы однородны и обладают одинаковой скоростью. Но не это самое главное. Потребовалось поставить еще много опытов для того, чтобы точно определить массу α -частиц. На рис. 28 и 29 изображен резерфордовский аппарат, демонстрирующий магнитное отклонение α -излучения. В этом аппарате α -излучение, испускаемое радием, проходило через направляющие щели в магнитном поле, под воздействием которого его траектория принимала дугообразную форму с радиусом около 40 см (по оценке Резерфорда), таким образом, магнитное поле препятствовало попаданию излучения в электроскоп. Водород в газообразном состоянии увеличивал дальность пробега α -частиц, позволяя им проделывать более длинный путь в магнитном поле и значительно повышая их ионизирующий эффект, уподобляя его проникающему без отклонений γ -излучению. На рис. 29 показано, как, наполювину прикрыв щели, можно установить направление и убедиться в том, что оно противоположно направлению легко отклоняемых β -частиц. На рис. 30 изображена диаграмма М. Кюри, демонстрирующая отклонение трех видов излучения в магнитном поле, действующем под прямыми углами к плоскости рисунка. На диаграмме разница в отклонении α -частиц и легко отклоняемых β -частиц для наглядности специально увеличена.

Подобно тому как открытие катодных лучей в вакуумной трубке предшествовало обнаружению β -излучения, некоторые из ранее известных «каналовых лучей» в вакуумной трубке оказались аналогичными α -излучению. Их обнаружил Гольдштейн, который, используя просверленный катод, заметил, что излучение устремляется через отверстие (канал) в пространство за катодом. В 1898 г. Вин доказал, что оно состоит из положительно заряженных ионов (движущихся со скоростью менее 1/100 скорости света, с непостоянным отношением e/m , которое менее зависит от находящегося в вакуумной трубке газа); однако масса составляющих излучение частиц никогда не бывает меньше массы иона водорода. Сейчас их обычно называют положительно заряженными ионами, и

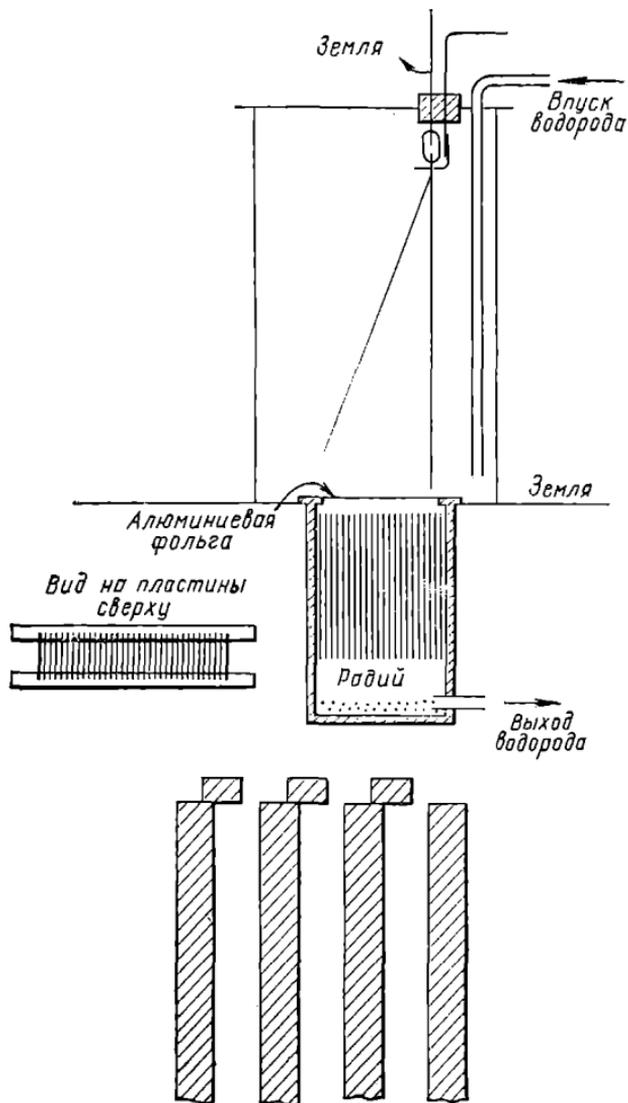


Рис. 28, 29. Аппарат Резерфорда, демонстрирующий отклонение излучения в магнитном поле

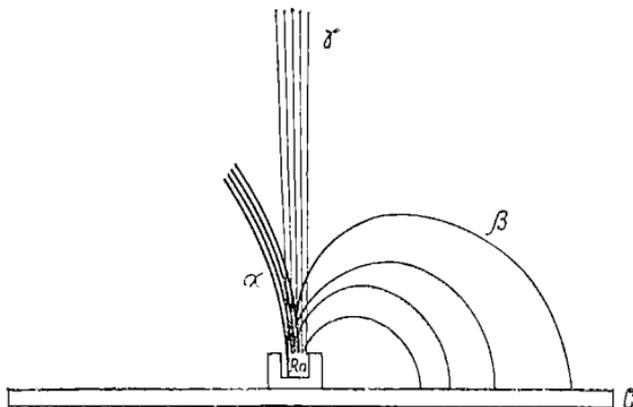


Рис. 30. Диаграмма М. Кюри, демонстрирующая отклонение «беккерелевских лучей» в магнитном поле

именно на измерениях Вина основывается современный метод определения массы отдельных атомов. Отсюда мы видим, что исследования в этой области были плодотворными.

Образование гелия из радия

Покинув в конце 1902 г. Монреаль, автор стал работать в Лондоне с сэром Вильямом Рамзаем, главным образом для того, чтобы тот подтвердил вывод автора об идентичности эманаций инертным газам. Прогуливаясь как-то в начале 1903 г. по Мортимер-стрит, автор заметил в витрине фирмы «Изенталь и К°», торгующей в основном электрооборудованием, объявление о продаже чистых соединений радия. Это была первая партия товара, производимого для торговли профессором Гизелем на предприятии в Брауншвейге. Товар предлагался за умеренную цену: лишь несколько шиллингов за 1 мг водного раствора бромид радия, содержавшего около 50% чистого элемента. Это в корне меняло положение вещей. Ведь ранее невозможно было найти препаратов, содержащих даже 1% чистого вещества! Теперь же сразу становилась осуществимой задача определения того, действительно ли количество гелия в минералах, содержащих уран и торий, увеличивалось с геологическим возрастом, как об этом убедительно свидетельствовали многочисленные факты.

В то время в мире существовало только одно место, где дан-

ную гипотезу можно было доказать экспериментальным путем. Таким местом была лаборатория сэра Вильяма Рамзая в Университетском колледже в Лондоне, где сам ученый вместе со своими талантливыми сотрудниками, в частности М. В. Траверсом и Е. Бейли, в ходе исследования инертных газов атмосферы разработал простую микротехнику для спектроскопического анализа и наблюдения за малыми количествами газов. Ксенон, например, содержится в воздухе в пропорции 1 : 20 000 000, и поэтому исследовать его приходилось в объеме, равном ничтожной доле кубического сантиметра, многократно пропуская его без каких-либо потерь, что по тем временам являлось беспрецедентным искусством обращения с газами.

Однако для решения рассматриваемой нами проблемы требовались выделение, очистка и спектроскопическая идентификация гелия в количестве, намного меньшем, чем $0,0001 \text{ см}^3$. Это примерно равно объему капилляра ртутного термометра. Но 30 мг изотоповой манны небесной оказалось достаточно для того, чтобы за несколько недель доказать, что из радия образуется гелий; 50 мг бромида радия позволили наблюдать ежедневное прибавление количества гелия в закупоренной спектральной трубке, в которой первоначально находился только радон. Правда, для изготовления такого миниатюрного аппарата сэру Вильяму Рамзаю пришлось применить все свое искусство стеклодува. Это был первый случай трансмутации, установленной с помощью ранее известных методов. На рис. 31 изображен аппарат, которым Рамзай и Содди пользовались для доказательства того, что гелий генерируется радием. Бромид радия помещали в колбу *A* и растворяли в воде в колбе *B*, причем первоначально всю систему откачивали. Водород и кислород удаляли с помощью раскаленной спирали из окиси меди во время нахождения газа в колбе *C*; вода же поглощалась пятиокисью фосфора в колбе *D*. После охлаждения в систему пускали ртуть из сосуда *G*, а отрезок трубки *E* охлаждали жидким воздухом с целью конденсации двуокиси углерода и радона. Затем газ пропускали в спектральную трубку *F*, которая показана более крупным планом справа на рис. 31. Было обнаружено, что эта трубка дает спектр гелия.

Доступный исследованию объем радона составлял всего $0,00003 \text{ см}^3$, и самое точное по тем временам его измерение показало, что минимальное среднее время жизни радия — 1150 лет (впоследствии была установлена уже упоминавшаяся нами точная цифра — 2300 лет). Эта экспериментальная оценка минимального времени жизни радия была получена примерно в то же время, когда П. Кюри и Лаборд проводили calorиметрические измерения высвобождаемой энергии. Таким образом, в конце 1903 — начале 1904 г. было доказано, что радиоактивность сопровождается атомный распад, при котором энергия высвобождается в масштабах, в миллионы раз превышающих масштабы высвобождения энергии

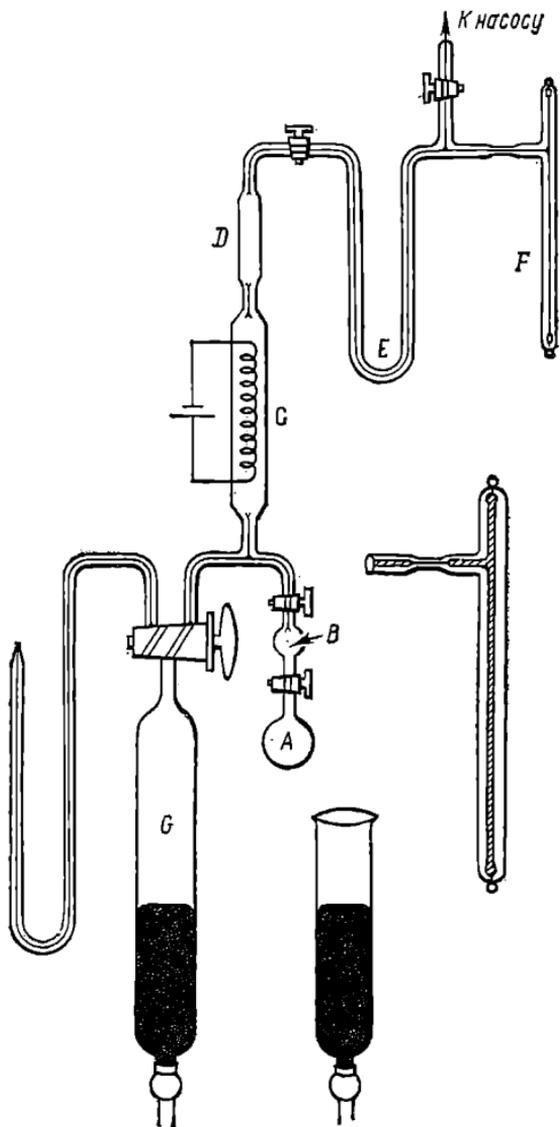


Рис. 31. Аппарат, использованный Рамзаем и Содди для доказательства генерирования гелия радием

при химических превращениях. Было также установлено, что в радиации этот процесс происходит достаточно быстро, для того чтобы можно было выделить в измеримых дозах его первый продукт — радон — в качестве нового аргонового газа и наблюдать его изменение в спектрографе (способном зафиксировать его продукт — гелий).

Генерирование гелия радием было в скором времени подтверждено несколькими исследователями, ставившими опыты с гораздо большим количеством радия. В частности, Гизелю удалось получить убедительную фотографию спектра газа, испускаемого радием (для сравнения он брал спектры гелия и водорода). Очень элегантное подтверждение, но совершенно другим способом получил сэръ Джеймс Дьюар, используя радиометр Крукса и свой собственный метод получения высокого вакуума путем охлаждения древесного угля в жидком воздухе. Дьюар обнаружил, что если в этом приборе остаточным газом является воздух, то при погружении сообщающегося с ним сосуда с древесным углем в жидкий воздух вращение лопастей полностью прекращается, даже если они освещаются светом дуговой лампы. Если в роли остаточного газа выступает водород, то вращение прекращается при опускании древесного угля в жидкий водород. Но если остаточный газ гелий, то погружение в жидкий водород не помогает. Если же в колбе содержится немного бромида радия, то при погружении сосуда с древесным углем в жидкий воздух вращение сначала полностью прекращается, а через 15 ч активно возобновляется и на него уже больше не влияет погружение данного сосуда в жидкий водород. Это — прямое доказательство того, что появился гелий, поскольку ни один другой газ не произвел бы такого эффекта.

Впоследствии ученым, открывшим актиний, полоний и ионий, удавалось опытным путем собирать выделяющийся из них гелий, причем каждое открытие в той или иной степени свидетельствовало об относительной α -активности этих элементов. С помощью специальной техники, предназначенной для этой цели, автору к 1909 г. удалось распространить данное открытие на первичные радиоэлементы — уран и торий, хотя, как было подсчитано, в год из 1 т радиоэлемента можно получить всего 0,01 см³ гелия. С помощью той же техники лорд Рэлей разработал метод определения возраста минералов по соотношению содержащихся в них урана и (или) тория с одной стороны и гелия — с другой, о чем уже шла речь выше. Сравнительно недавно Ф. Панет пришел к выводу, что этот метод особо ценен при определении возраста метеоритов, в которых количество гелия бесконечно мало, и поэтому его утечка ничтожна даже в масштабе космических эпох. Таким образом он показал, что возраст метеоритов находится в тех же пределах, что и возраст Земли.

В 1903 г. когда рассматриваемый нами предмет только начинали исследовать, предпринималось много безуспешных попыток

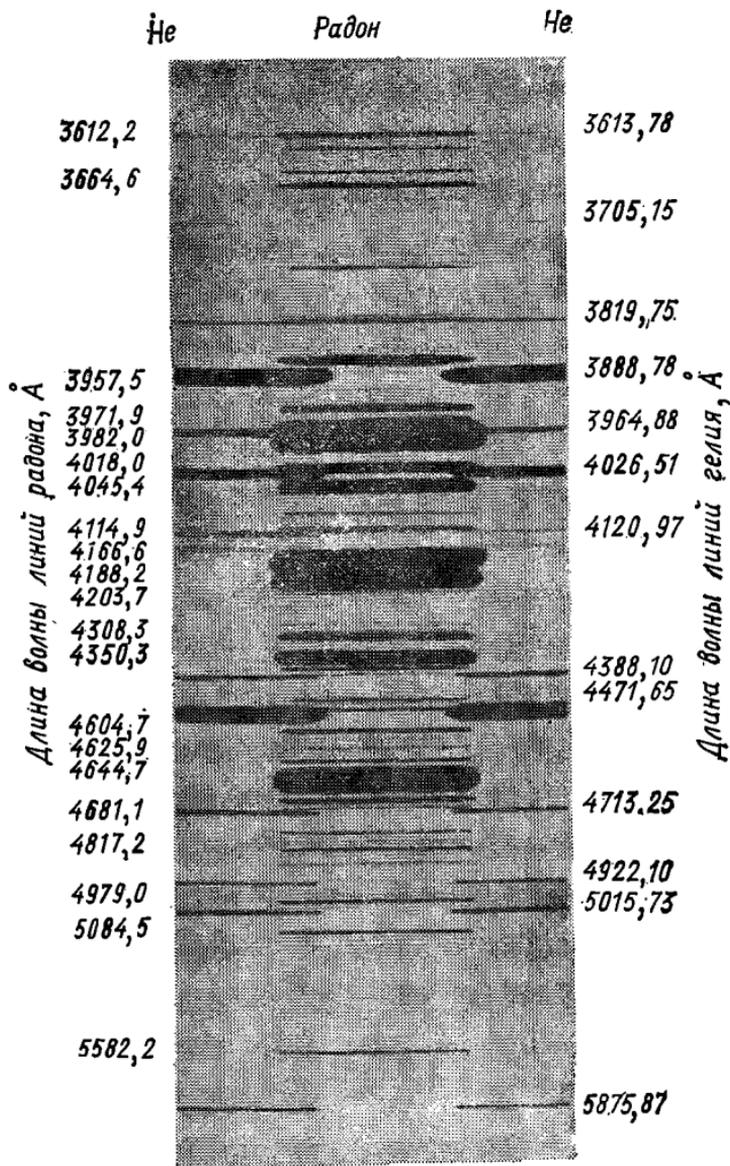


Рис. 32. Спектр радона, полученный Резерфордом и Ройдсом

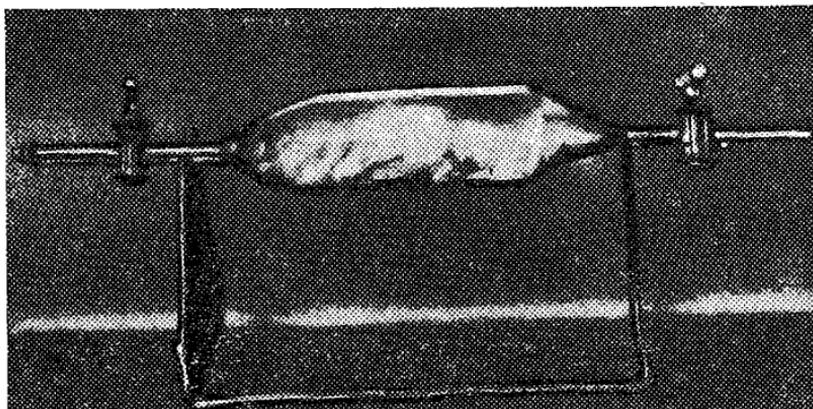


Рис. 33. Трубка с виллемитом для наглядной демонстрации радона

зафиксировать спектр нового аргонного газа — радона. Однако количество доступного ученым радия было, как мы теперь знаем, безнадежно малым для решения этой задачи. При каждой такой попытке в только что наполненной радоном спектральной трубке появлялся новый спектр в виде мгновенной вспышки, но тут же уступал место обычным спектрам водорода и двуокиси углерода, которые всегда появляются в подобных крошечных трубках на пороге непроходимости. Позднее Венская Академия наук предоставила Рамзаю и Резерфорду каждому по несколько сот миллиграммов радия, и обоим ученым удалось получить желаемый результат. Используя растровый спектроскоп, Резерфорд совместно с Ройдсом получил отличную фотографию спектра радона, изображенную на рис. 32. Спектр радона виден посередине, а с обеих сторон от него для сравнения показаны спектры гелия. Радоновым спектральным трубкам присуще сбивающее с толку свойство «выдыхаться» (т. е. становится непроводящими) при разряде в еще большей степени, чем ближайшему гомологу радона — ксенону, в котором это свойство уже четко прослеживается. Именно этим и объясняется то, что первоначальные попытки зафиксировать спектр радона были неудачными.

Следующие далее иллюстрации относятся к поразительным лекционным экспериментам, которые нетрудно продемонстрировать в затемненной комнате, располагая радоном, полученным из нескольких миллиграммов радия. На рис. 33 воспроизведена фотография трубки с виллемитом, которая используется для наглядной демонстрации радона. На рис. 34 показана та же трубка, запол-

ненная радоном и сфотографированная в испускаемом этим газом флюоресцентном свете. Стекло и виллемит светятся слабо. На рис. 35 изображен аппарат для лекционного эксперимента, демонстрирующий конденсацию радона жидким воздухом. Соединяющие трубки могут быть любой длины. В затемненной комнате воздух из резиновой груши загоняет радон в U-образную трубку, которая ярко светится в тех местах, где в нее попадает этот газ. После удаления U-образной трубки из жидкого воздуха она разогревается, и свечение распространяется на остальную часть виллемита. Если подсоединить стеклянный сосуд, изображенный справа и покрытый изнутри слоем сульфида цинка, то легкого дуновения воздуха достаточно для того, чтобы туда переместился радон, вызвав тем самым свечение сосуда. При этом, однако, находящийся в трубках виллемит будет по-прежнему ярко светиться, и это объясняется тем, что радон после себя оставляет активный осадок.



Рис. 34. Флюоресценция, производимая в виллемите радоном

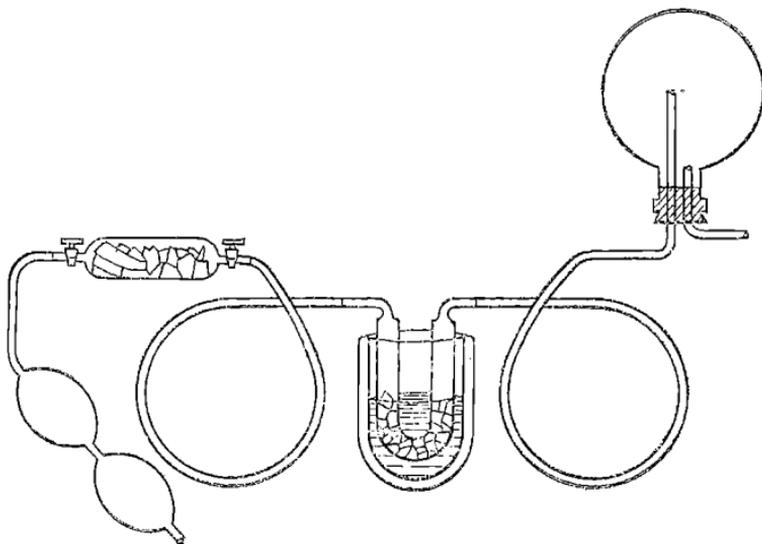


Рис. 35. Аппарат, демонстрирующий конденсацию радона жидким воздухом

Радиоактивное равновесие

Благодаря тому что каждый последующий продукт распада, в свою очередь, превращается в новый элемент, они могут накапливаться только до того момента, когда скорость распада (пропорциональная накопленному количеству) уравнивает скорость образования (пропорциональную количеству непосредственно материнского вещества). Это условие называется *условием радиоактивного равновесия* и влечет за собой много интересных выводов. В частности, оно применимо к радиоактивным минералам, где, вследствие его выполнения, все последующие члены ряда существуют в количествах, пропорциональных их среднему времени жизни, и где одинаковое число атомов всех последующих продуктов (независимо от общего количества вещества) расщепляются одновременно и испускают одинаковое число α - или β -частиц в секунду.

Период полураспада радия был непосредственно вычислен путем сравнения соответственных количеств радия и радона, находящихся в равновесии; отсюда было вычислено отношение числа их атомов, а затем период полураспада радона умножили на это отношение. Аналогичным образом период полураспада урана должен быть примерно в три миллиона раз больше периода полураспада радия, потому что, как уже отмечалось, именно в таком соотношении эти два элемента сосуществуют в минерале. В подобную оценку необходимо внести небольшую поправку на существование малоактивного независимого ряда актиноурана; общепринятая оценка среднего времени жизни урана $6,3 \cdot 10^9$ лет (для тория она больше в четыре раза). Поскольку по радиоактивной оценке возраст Земли равен только $1,8 \cdot 10^9$ лет, а за это время не подверглась бы распаду и четвертая часть первоначально существовавшего урана (не говоря уже о тории), то не имеется никаких оснований считать, что в недрах Земли происходит какое-либо сопутствующее воспроизводство этих двух элементов.

Материнские вещества полония, актиния и радия

Вместе с тем с самого начала было ясно, что полоний, актиний и радий генерируются в содержащих их минералах. Исследованием этого вопроса ученые и занялись в первую очередь.

Раньше всего было установлено происхождение полония; это удалось осуществить Резерфорду. В 1903 г. супруги Кюри обнаружили, что активный осадок радия, в отличие от осадков полония и актиния, не распадается полностью со временем, а постоянно остается небольшой осадок, активность которого составляет примерно $1/20\ 000$ начальной активности элемента. Резерфорд, изучивший три первых быстрых последовательных изменения активного

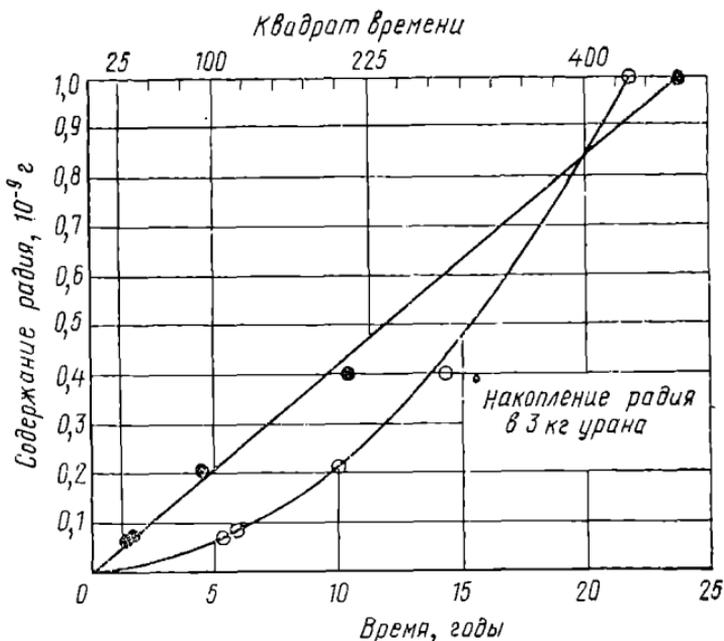


Рис. 36. Диаграмма процесса генерирования радия ураном

осадка радия, обозначил эти продукты, следующие один за другим после эманации, буквами А, В и С. В случае с радием имеется еще и радий-D (RaD), который был уже раньше обнаружен в урановой смолке и известен как *радиосвинец* из-за своего химического сходства со свинцом, благодаря которому его невозможно отделить от свинца, присутствующего во всех радиоактивных минералах. RaD, в свою очередь, переходит в RaE, который представляет собой β -излучатель с продолжительностью жизни всего в несколько дней. RaE переходит в RaF, который идентичен открытому М. Кюри полонию и является последним радиоэлементом в основном урановом ряду. Среднее время жизни полония равно 202 дням, а RaD — около 30 лет. Последний испускает очень слабопроникающее β -излучение.

Непосредственно материнским веществом для радия является новый радиоэлемент, открытый в 1907 г. Болтвудом путем выделения его из урановых минералов вместе с присутствующим там торием и названный *ионием*. Безусловно, первенство в открытии

иония должно было бы принадлежать Дебьериу, выделившему его вместе с актинием, однако тогда ионий не был признан самостоятельным радиоэлементом. Уже в 1903 г. автор этих строк начал серию экспериментов, имевших целью установить, выделится ли со временем ионий из уранового препарата, тщательно очищенного от радия. Если бы радий был прямым продуктом урана, то уже через полчаса положительный результат был бы налицо, однако из-за «вмешательства» иония в ряд распада результата пришлось ждать добрую дюжину лет. Ведь у иония период полураспада примерно в 50 раз больше, чем у радия, и поэтому вначале он практически полностью сдерживает и отбрасывает поток радия, одновременно вызывая усиление его генерирования пропорционально квадрату времени (подобно расстоянию, преодолеваемому падающим камнем). Измерения велись в течение 30 лет, и они полностью подтвердили этот теоретический закон; определение скорости генерирования радия позволило также вывести с погрешностью не более 5% среднее время распада иония — 100 000 лет. На рис. 36 изображен график, показывающий, как радий генерируется ураном. Измерения накопления радия были сделаны посредством регистрации количества радона, образованного в растворах и вводимого в герметический электроскоп. Длина вертикальной шкалы соответствует 0,000 001 мг радия. Нижняя горизонтальная шкала показывает время (в годах), прошедшее с момента очистки вещества, а верхняя горизонтальная шкала — время (в годах) в квадрате. Нижняя кривая (с незакрашенными кружками) показывает увеличение количества радия по годам, а верхняя прямая линия — увеличение количества этого вещества соответственно квадрату времени. Измерение дало сумму среднего времени жизни радия и иония — около 240 миллионов лет в квадрате. На рис. 37 изображен сосуд, содержащий 3 кг урана в виде раствора уранил-нитрата. С его помощью и был получен результат, изображенный графически на рис. 36. Концентрированный раствор вещества находится в пятилитровом сосуде, который окружен водной средой. Для того чтобы большая часть пара не улетучивалась, применялся конденсатор. Сосуд всегда герметически закупорен, за исключением того момента, когда выпаривается накопившийся радон. На рис. 38 и 39 показаны фотография и схема радонового электроскопа. Он представляет собой стеклянный сосуд, посеребренный изнутри. Сквозь отверстие в серебряном покрытии виден находящийся внутри сосуда золотой лепесток, изменение положения которого можно зафиксировать с помощью микроскопа. Спад лепестка на одно деление в минуту соответствует утечке $2 \cdot 10^{-11}$ г (одна пятидесятиллионная миллиграмма) радия. Характерное свойство этого аппарата заключается в том, что, чем меньше утечка, тем более точный результат он показывает, и, таким образом, если опыт проводить очень аккуратно, то увеличение утечки на 1/20 деления в минуту уже важно.

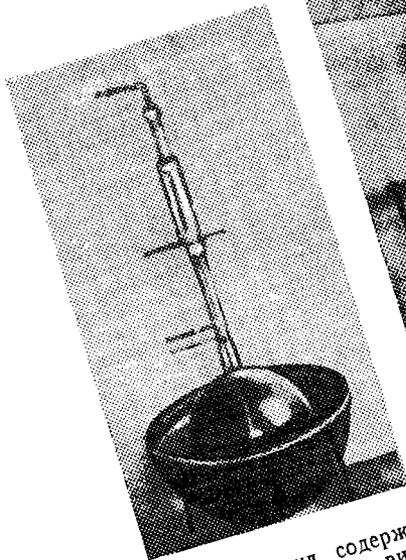


Рис. 37. Сосуд, содержащий 3 кг урана в виде уранил-нитрата



Рис. 38. Радоновый электроскоп

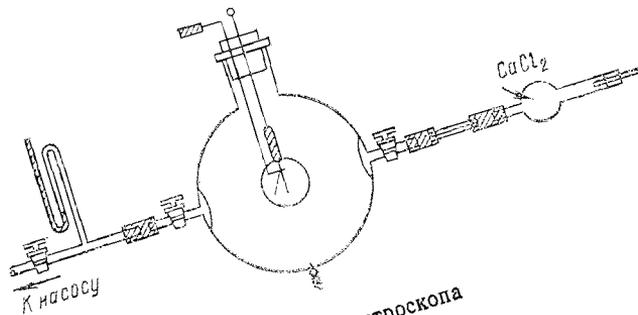


Рис. 39. Схема радонового электроскопа

Что же касается актиния, то, руководствуясь его процентным отношением к урану в минералах, Болтвуд сделал вывод о том, что, как и радий, он является продуктом распада урана, однако относится не к основному, а к отдельному малому радиоактивному ряду, поскольку его доля в общей радиоактивности составляет всего несколько процентов. Вместе с тем вплоть до последнего времени не было до конца ясно, какое вещество является для актиния материнским, но об этом пойдет речь в одиннадцатой главе.

Исследование Брэгом природы альфа-излучения

Помимо высказанного в уже рассмотренной нами работе мнения о том, что α -частица, по всей вероятности, идентична атому гелия, в 1904 г. теорию распада самостоятельно и очень убедительно подтвердил в ходе оригинального исследования профессор Брэгг (позднее — сэр Уильям Брэгг), работавший в то время в Аделаиде (шт. Южная Австралия). М. Кюри заметила, что ионизирующая способность α -излучения полония резко обрывается после определенного пробега в воздухе. Это качество присуще всем α -частицам (тогда как все другие виды излучения исчезают постепенно). Несколько позднее Брэгг с помощью Климана провел исследование α -излучения радия. В первую очередь необходимо пояснить термины, о которых пойдет речь ниже. Под «свежим» радием понимается соединение, только что приготовленное выпариванием его из раствора. Образованный в растворе радон улетучивается, и, таким образом, любой первоначально присутствовавший активный осадок полностью распадается в течение нескольких часов, а свежий радий испускает только α -частицы, производя (в первом превращении) радон. Под «старым» радием понимается соединение, содержащее равновесные количества продуктов распада. Восстанавливая равновесие, соединения в твердом состоянии, в которых радон сохраняется и не претерпевает потерь, полностью достигают равновесия за время от трех недель до месяца, при этом интенсивность α -излучения возрастает, по сравнению с началом процесса, в четыре раза, а интенсивность β - и γ -излучения увеличивается за это время с нуля до своего максимального значения.

Был проделан следующий опыт. Ровную поверхность пластинок покрывали тонким слоем соединения радия, а над ней устанавливали коллиматор — решетку толщиной в 2 см, которая поглощала α -частицы, движущиеся обычно под углом к поверхности. Сверху к решетке постепенно придвигали почти плоскую ионизационную камеру (расстояние между пластинками 1—2 мм), измеряя в тонком слое воздуха ионизацию, вызываемую α -частицами, по мере сокращения расстояния между решеткой и камерой. На расстоянии, превышающем 7 см, ионизации не происходило, однако в случае, если верхние слои вещества содержали старый радий, в

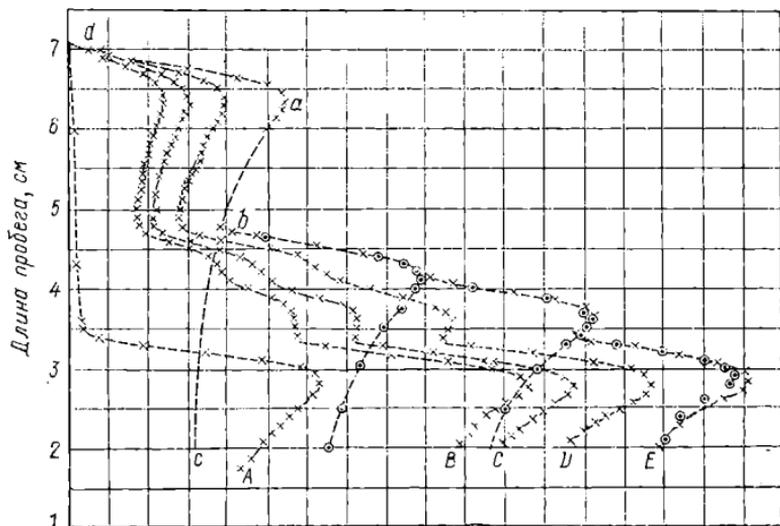


Рис. 40. Кривые пределов ионизации для радия, полученные Брэггом.

7 см от решетки наблюдалось внезапное увеличение ионизации, достигавшее своей наивысшей точки на расстоянии 6,3 см. Затем, вплоть до уровня 4,8 см, интенсивность ионизации постепенно ослабевала, однако на этом расстоянии один за другим следовали еще два взрыва ионизирующей активности, равные по своей силе первому, но превышавшие в своей наивысшей точке (3,7 см) мощность первой кульминации в три раза. После этого, вплоть до уровня 3,4 см, интенсивность ионизации снова падала, затем увеличивалась в промежутке 3,4—2,9 см и опять уменьшалась вплоть до расстояния в 2 см от решетки.

Если же поверхность покрывали слоем свежего радия, то ионизация отсутствовала вплоть до расстояния в 3,4 см, затем достигала наивысшей точки в 2,9 см от решетки и вновь спадала. В то же время в активном осадке радия, взятом через 10 мин после его приготовления из радона (время, за которое короткоживущий RaA полностью распадается, так что α -излучение исходит только от RaC'), ионизация, как и при опыте со старым радием, начинается на расстоянии 7 см, достигает наивысшей точки на расстоянии 6,3 см, а после этого постепенно уменьшается вплоть до расстояния 2 см от решетки. Изучая переход радия из свежего состояния в старое, на что уходит один месяц, Брэгг обнаружил, что кривая

ионизации постепенно изменяется от 25%-ной α -активности в начале до 100%-ной α -активности в конце, что вызывается тремя новыми группами α -частиц, которые постепенно сходятся и достигают совместно наивысшей точки. При этом комплексной кривой для старого радия являются четыре раздельные, но налагающиеся одна на другую линии, известные ныне как *кривые Брэгга*. Таким образом, при нормальной температуре и давлении кривые Брэгга и дают то, что мы теперь называем *длиной пробега* в воздухе этих четырех групп α -частиц, причем длина пробега α -частиц самого радия равна примерно 3,4 см, радона — 4,1 см, RaA — 4,7 см, и RaC' — 7 см. О последнем элементе известно, что α -частица испускается продуктом RaC, называемым нами RaC', который, однако, настолько быстро распадается, что его невозможно выделить и зафиксировать в чистом виде. На рис. 40 изображены полученные Брэггом кривые пределов ионизации для радия. Кривая A относится к одиночной частице с минимальным пробегом для чистого радия. По мере возникновения продуктов распада радий проходит в течение определенного времени стадии, соответствующие кривым B, C и D, и через месяц заменяется на стадии кривой E старым радием. Это превращение имеет место благодаря трем α -частицам с большей длиной пробега, испускаемым радоном, RaA и RaC', которые соединяются и достигают соотношения равновесия. Линия *cbad* представляет собой единственную кривую RaC', обладающего α -частицами с самой большой длиной пробега, и ее нетрудно получить, исследуя активный осадок после того, как содержащийся в нем короткоживущий RaA полностью распадается.

Итак, с помощью описанного выше опыта удалось исследовать четыре продукта старого радия, испускающие α -излучение, путем сравнения длины пробега нескольких испускаемых ими α -частиц. Огромное значение этого опыта заключается в том, что с его помощью удалось доказать, что все α -частицы, испускаемые при одном превращении, однородны и движутся с одинаковой скоростью. Ныне известно, что корень кубический из длины их пробега в воздухе (в сантиметрах) при нормальной температуре и давлении, умноженный на 10^9 , почти точно соответствует скорости α -частиц в см/сек. Более того, нет никакой разницы между быстро и медленно движущимися α -частицами, если скорость первой из них уменьшить до уровня скорости второй путем пропускания ее сквозь достаточно плотный слой воздуха или другого вещества. Ионизирующая способность α -частиц возрастает по мере падения скорости и довольно резко обрывается, когда скорость уменьшается до $2/3$ скорости α -частиц RaC, чем и объясняется несколько необычная форма кривой ионизации Брэгга.

На рис. 41 изображен прибор для определения длины пробега α -частиц. Он состоит из перевернутой колбы диаметром 15 см с покрытым слоем сульфида цинка полушарием, находящимся напротив узкой части. В центре колбы расположен диск, покрытый

слоем радия или полония. Воздух поглощает α -частицы, и колба не светится в темноте до тех пор, пока часть воздуха не откачивается воздушным насосом. Тогда колба мгновенно вспыхивает ярким светом, однако, если возобновить приток воздуха, свечение так же быстро пропадает.

Сэр Вильям Брэгг сделал оригинальный вывод о том, что α -частицы свободно проходят сквозь попадающиеся на их пути атомы, как если бы их вообще не было, теряя при этом небольшую долю своей энергии, однако количество частиц в потоке остается неизменным.

Позднее камера Вильсона позволила всем наглядно убедиться в замечательности этого открытия, сделанного на такой ранней стадии, но тем не менее изменившего всю последующую историю человечества.

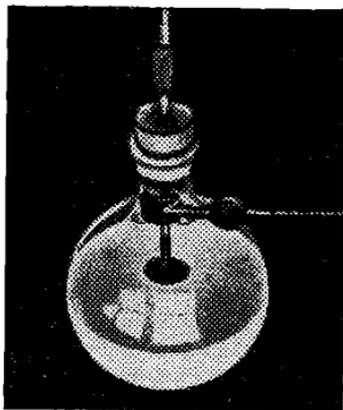


Рис. 41. Аппарат, применявшийся для определения длины пробега α -частиц

Альфа-частица — это испускаемое ядро гелия

Тем временем Резерфорд совершенствовал свои способы измерения отклонений α -частиц в электрических и магнитных полях, однако теперь это делалось уже не для суммы разных групп α -частиц радия, а отдельно для каждой из четырех групп частиц и также для других обособленных групп, как, например, для α -частиц, испускаемых RaC' . К тому времени, основываясь на многочисленных свидетельствах, ученые все больше утверждались в мнении, что условно допущенная ими с самого начала простота явления по сути дела и являлась истиной. При распаде каждый атом испускает одну α - или одну β -частицу, превращаясь при этом в атом нового элемента. Иногда, особенно в активных осадках, подобное превращение влечет за собой выделение одновременно α - и β -частиц, однако это происходит благодаря превращениям, следующим друг за другом с такой скоростью, что их невозможно зафиксировать (как, например, при превращении RaC в RaC'). В некоторых продуктах распада активного осадка один и тот же атом может расщепляться двумя различными способами: при одном испускании β -частицы следует за испусканием α -частицы, а при другом — предшествует ему. Прибегая к уже использованной нами аналогии, этот процесс можно представить следующим обра-

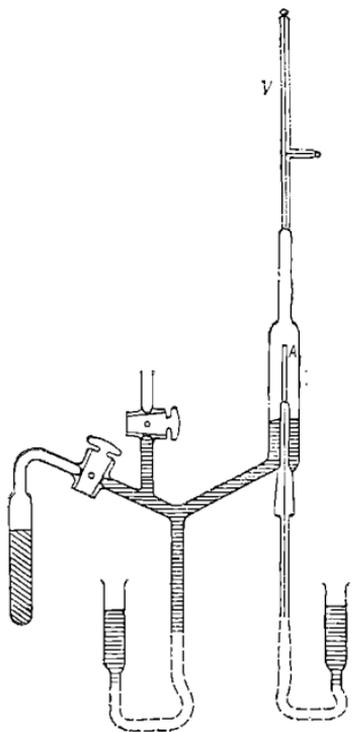


Рис. 42. Аппарат, применявшийся Резерфордом и Ройдсом для получения гелия из радона

то, о чем в течение долгого времени только догадывались: α -частица является атомом гелия, утерявшим два своих электрона и представляющим собой то, что мы теперь называем *свободным ядром гелия*.

В 1909 г. Резерфорд и Ройдс с помощью профессионального стеклодува Баумбаха провели следующий опыт. Взяв несколько сот миллиграммов радия, они поместили получившийся из него радон в капиллярную стеклянную трубку, стенки которой были настолько тонкими, что α -частицы свободно проникали через них, однако газ эти стенки не пропускали. Спектроскоп показал, что вокруг трубки скапливается гелий. Но для этого толщина стенок трубки не должна превышать $0,0005-0,00075$ см. Прибор Резер-

фом: два духа разрушения независимо друг от друга колдуют над одним и тем же веществом, в результате чего появляются «радиоактивные вилки». Однако рассмотрение этого сложного явления не входит в задачи данной главы, и поэтому оно включено в главу о законе радиоактивных смещений, к которому мы обратимся несколько позже.

Что же касается исследования природы α -частиц, то оно было полностью завершено только в 1909 г. Было установлено, что начальная скорость их испускания колеблется для различных видов α -частиц от $1/15$ до $1/20$ скорости света. Отношение e/m одинаково для всех видов α -частиц, и с помощью ставших к тому времени доступными более точных методов измерения удалось вычислить, что оно почти в два раза меньше соответствующего отношения для иона водорода. После того как ученые научились подсчитывать количество отдельных α -частиц (о чем подробно говорится ниже), было доказано, что каждая α -частица несет заряд, равный $2e$, и, следовательно, ее масса в четыре раза больше массы водорода. Так экспериментальным путем удалось доказать

форда и Ройдса изображен на рис. 42. Изготовленная Баумбахом тонкостенная капиллярная трубка *A* содержит радон, причем испускаемые им α -частицы проходят сквозь стеклянные стенки и попадают во внешний сосуд *T*. Если после завершения распада радона сосуд *T* заполнить ртутью, то она вытеснит газообразное содержимое сосуда в спектральную трубку *V*, где и наблюдается спектр гелия. В то же время при заполнении капиллярной трубки *A* гелием этому газу не удастся проникнуть в сосуд *T*. Данный опыт показывает, что происходит с α -частицей на пути прохождения ею сквозь атомы вещества, и именно он привел к появлению ядерной теории атомной структуры.

Общее направление исследований Брэгга было верным, но не до конца: да, α -частицы проходят сквозь атомы вещества так, как будто их почти не существует — почти, но не полностью! Много позднее в руках Резерфорда это явилось ключом, открывшим дверь, за которой лежало неограниченное высвобождение атомной энергии по воле человека. Время покажет, был ли таким образом открыт путь в райские кущи или в преисподнюю.

Глава шестая. ЭНЕРГИЯ И МАССА. ИЗОТОПЫ

В первой главе было дано полное и достаточно удовлетворительное объяснение радиоактивности как процесса распада атома, при котором освобождается в миллион раз больше энергии, чем от любого ранее известного источника. Однако эта энергия, как мы теперь знаем, — лишь малая часть ранее неведомого запаса, скрытого в атоме и наблюдаемого только при его распаде. Слово «только» применено здесь не случайно. Оно предполагает наличие источника, из которого Солнце и звезды черпают световую и тепловую энергию; оно объясняет также бессилие химии осуществить искусственное превращение элементов. Проблема высвобождения первичной энергии Вселенной с тех пор стала отождествляться с давнейшей задачей трансмутации, только теперь целью был поиск не холодно блестящего золота, а источника жизненной энергии для оживления всей природы — как живых существ, так и солнц. Философский камень, если отказаться от его извращенного толкования легендой алхимии, является также эликсиром жизни.

Электромагнитная теория массы

Мы еще не касались одного очень важного результата, хотя он и относится к этому начальному периоду. Речь идет об экспериментальном подтверждении Кауфманом в 1902 г. на β -излучении

радия того, что странным образом следовало из электромагнитной теории света. А из нее вытекало не только то, что электрический заряд при его достаточной концентрации обладает, как обычное вещество, инерциальной массой (массой покоя), но и то, что эта масса возрастает с увеличением скорости движения заряда. Согласно этой теории, масса при скорости света стремится к бесконечности, хотя при $1/10$ этой скорости увеличение ее составляет лишь 1—2% первоначального значения, и даже при скорости, составляющей 99% скорости света, она увеличивается всего-навсего в три раза. Конечно, все эти вычисления на основе представлений об электричестве и магнетизме были лишь приближениями, с помощью которых разные ученые получали выражения, отличающиеся одно от другого и от принятой позднее простой формулы; однако Кауфман достаточно точно проследил увеличение массы электрона (или β -частицы) с повышением его скорости и показал, что при скорости электрона выше 75—95% скорости света его масса увеличивается в 1,37—2,15 раза по сравнению с массой, скажем, относительно медленно движущихся электронов, из которых состоят катодные лучи.

Следует отметить, что эта теория имела сугубо физическое обоснование в рамках известных законов электромагнетизма. Так, например, можно было отчетливо представить, каким образом электрическая или инерциальная масса должна сопровождать любое движение электрического заряда. Согласно Фарадею, электрическое силовое поле обязательно требует существования некоей энергии (а именно, потенциальной) в пространстве, в котором действует электромагнитная сила. Это силовое поле возникает лишь при движении электрического заряда; неподвижный же заряд его не имеет. Следовательно, заряд может двигаться, только непрерывно излучая энергию в окружающее пространство для образования своего силового поля. И прежде чем движение заряда может быть прекращено, энергия поля должна вернуться к заряду, сопротивляясь любому изменению скорости движения — ее увеличению или уменьшению (аналогично действию инерции на любое тело). Согласно электромагнитной теории света, все изменения электромагнитного поля в пространстве, окружающем заряд, происходят со скоростью света (ведь фактически и свет сам по себе является не чем иным, как высокочастотными колебаниями электромагнитного поля в данном пространстве). Но здесь приведенные рассуждения наталкиваются на противоречащий факт, который был экспериментально установлен Майкельсоном и Морли в 1887 г. и повторно продемонстрирован позднее, в 1906 г. Эти ученые установили, что скорость света во всех направлениях совершенно не зависит от скорости движения Земли вокруг Солнца. Этот результат был совершенно несовместим с традиционными представлениями о движении материи и об аддитивности отдельных движений в обычной динамике.

Здесь следует отметить, что математики первые признали справедливость формулы, которую всякий другой расценил бы как произвольный набор основных единиц длины, массы и времени. Ныне эта формула широко известна под названием *преобразование Лоренца* или *преобразование Фитцджеральда*. Согласно этой формуле, все единицы длины в направлении движения уменьшаются путем умножения на множитель F , меньший единицы, а единицы времени и массы увеличиваются путем деления на этот же множитель, который представляет собой корень квадратный из разности между единицей и отношением квадрата скорости перемещения систем, движущихся одна относительно другой, к квадрату скорости света:

$$F = \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

где c — скорость света ($3 \cdot 10^{10}$ см/сек), а v — относительная скорость двух систем. Множитель F равен единице для обычных скоростей и нулю при скорости света, вследствие чего единица длины при движении со скоростью, приближающейся к скорости света, стремится к нулю, а единицы времени и массы при этой скорости стремятся к бесконечности. Это свидетельствует о том, что никакая другая скорость не может превышать скорости света. Однако здесь нас интересует, главным образом, единица массы.

Теория относительности

В 1905 г. Эйнштейн опубликовал свою знаменитую теорию относительности, обобщив результат, уже установленный для электрона, на все случаи инерциальной массы, с зарядом или без заряда. Любопытно, что прежде такие результаты, пусть даже сначала удивительные, можно было предсказать, исходя из электромагнитной теории. Считалось очевидным полагать, что материя сама по себе имеет электрическое происхождение, о чем столь часто приходилось слышать в первом десятилетии XX в. под названием «электрической теории вещества». Даже исходя из уровня знаний тех лет эти догадки еще отнюдь не являлись, собственно говоря, теорией, но были просто ошибочным мнением, основанным на том, что поскольку электрический заряд должен обладать инерциальной массой, то вещество должно быть построено из электрических зарядов. Это рассуждение полностью исключало представление о весе и гравитационном притяжении и сваливало в одну кучу самые разные физические, химические и радиоактивные изменения, когда вещество теряет отрицательно заряженные электроны (например, если тереть смолистые вещества фланелью или при образовании положительных ионов электроположительными элементами, а также при β -распаде в радиоактивных явлениях).

Теория относительности не зависела от теорий природы электричества и вещества и была логическим следствием независимости скорости света от относительного перемещения передатчика и приемника. Приложимость этой теории была сначала ограничена кратковременными астрономическими событиями. Она в совершенстве объясняла слабое, до того времени необъяснимое возмущение в орбите планеты Меркурий, но другие предсказания касались столь малых эффектов, что убедительные подтверждения не были возможны, за исключением уже происшедших превращений.

Однако исходный постулат Эйнштейна заключался в том, что все природные явления подчиняются законам природы, характер которых не зависит от равномерного прямолинейного движения, и, следовательно, явления природы подчиняются закону сохранения энергии. Преобразование Лоренца в этом случае дало для кинетической энергии наглядное выражение mc^2/F , где m — масса тела в состоянии покоя. Более точно кинетическая энергия выражается бесконечным рядом, в который она преобразуется биномиальной теоремой алгебры (здесь наиболее важны лишь первые три слагаемых):

$$\frac{mc^2}{F} = mc^2 + \frac{1}{2} mv^2 + \frac{3}{8} \frac{mv^4}{c^2} + \frac{5}{16} \frac{mv^6}{c^4} + \dots$$

Привычным выражением для кинетической энергии движущегося тела здесь является только второе слагаемое ряда. Другие слагаемые имеют значение только при скоростях, составляющих заметную часть скорости света. Но первая величина колоссальна, причем она одинакова для движущейся массы и для массы в состоянии покоя.

Если бы не уже имеющееся знание о существовании атомной энергии, то это первое слагаемое интерпретировалось бы — как это и было в течение долгого времени — только как математическая константа, т. е. как нулевая или как заданная точка отсчета, от которой вычисляли бы увеличение кинетической энергии с ростом скорости, для того чтобы выразить ее как функцию скорости. Но открытие атомной энергии придало этому первому слагаемому тот возможный смысл, что оно выражает полную внутреннюю энергию вещества. Этот столь неожиданный результат, по-видимому, все еще нуждается в подтверждении. Конечно, нельзя ожидать, что прирожденный экспериментатор сможет принять его без убедительного доказательства.

Внутренняя энергия массы

До сих пор чистая логика, которую олицетворяет теория относительности, была почти совершенно беспомощной в попытках раскрыть глубинные тайны природы — без помощи индукции и

эксперимента. Но данный постулат Эйнштейна, если интерпретировать первое слагаемое как полную внутреннюю энергию массы, а следовательно, и материи вообще, отвечает на вопрос, который раньше все физические дисциплины считали неразрешимым в силу его характера, а именно: какова полная энергия любого поля? Раньше все, что считалось доступным познанию, сводилось к различию между количеством энергии любой системы до и после какого-либо изменения, ей присущего или искусственно вызванного в ней. Но фундаментальная идея, что энергия и масса могут иметь общую природу, никогда до сих пор не возникала. Так, электричество и вещество оставались все еще не связанными между собой.

Эквивалентность массы и энергии

Именно знаменитый постулат Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии сводит законы сохранения массы и энергии в один общий закон и делает массу и энергию взаимобратимыми. Он указывает как на возможность полного превращения массы в энергию и уничтожения как таковой, так и на обратную возможность: возникновение массы при исчезновении эквивалентного количества энергии. Этот постулат является следствием логики и математики, хотя, как и раньше, он далек от реальных (или физических) явлений. Определяя зависимость массы электрического заряда от его скорости, данный постулат является олицетворением простоты.

Нет такого изменения, при котором оставалась бы неизменной или масса, или энергия: во всех случаях изменение одного влечет за собой изменение другого, но в обратном направлении. Если выразить изменение массы в единицах энергии, то суммарная энергия будет постоянной. Единицей энергии в системе СГС является эрг. Следовательно, 1 г массы эквивалентен $9 \cdot 10^{20}$ эрг. Это основное отношение взаимоперехода. Так, исчезновение 1 г массы сопровождается освобождением именно этого количества энергии, и наоборот. Если выразить массу в единицах тепла, то 1 г массы будет эквивалентен 20 000 000 кал. Одна тонна содержит 1 000 000 г. Энергия, освобожденная путем уничтожения 1 г вещества, примерно равна энергии, выделяющейся при сжигании 4 000 т угля!

Изменение массы по отношению к изменению энергии настолько мало, что в течение нескольких десятилетий нельзя было проверить этот вывод теории относительности, вплоть до нашего времени остающийся наиболее поразительным и важным. Если при полном распаде урана на свинец и гелий пренебречь массой испускаемых электронов, то потеря массы, вычисленная по выделению энергии, составит около $\frac{1}{5000}$ части. В любом химическом процессе энергии выделяется в миллион раз меньше. В Великобритании первым, оценившим физическое значение этого вывода из тео-

рии Эйнштейна, был, по-видимому, Дж. Дж. Томсон, указавший на это в своей Романской лекции в Оксфорде в 1914 г.

Астрофизики, обладающие богатым воображением, часто приводят пример, который, будучи проверенным фактом, касается наиболее популярной в настоящее время теории происхождения солнечной энергии. Однако это пока лишь умозрительная гипотеза, так как до сих пор экспериментально изучался только распад атомов, а не их синтез. Речь идет о том, что при температуре Солнца четыре атома водорода соединяются в один атом гелия, а поскольку на каждый грамм образующегося гелия потеря массы составляет около $\frac{1}{125}$ г, то выделяемая энергия примерно равна энергии, освобождающейся при сжигании около 32 т угля. Вот в чем сила простых рассуждений!

Здесь опять, как было с Марией Кюри, потомство может считать, что, как ни важен был принцип эквивалентности Эйнштейна, он имел меньшее значение, чем сам метод его открытия, ибо он позволил чисто логическим путем получить то, что раньше казалось невозможным. Это достижение, по крайней мере автору так кажется, не имело прецедента за всю историю физики. И здесь вновь уместно отметить роль Дж. Дж. Томсона. Ведь именно он применил свой метод в 1897 г. для точного определения скорости, массы и заряда положительных частиц в вакуумной трубке, являющихся, как показал Вин, положительно заряженными ионами. Тем самым Томсон дал в руки своего способного ассистента Ф. В. Астона метод, который (после соответствующего усовершенствования Астоном) позволил экспериментально подтвердить приведенное выше сугубо математическое предсказание. Подобные неожиданности нам больше не встретятся, поэтому мы должны теперь прямо перейти от проблемы относительности к рассмотрению изотопов. А пока нам остается лишь отметить, что к концу 1945 г., незадолго до смерти, Астон установил важность положения об эквивалентности энергии и массы в качестве основного принципа ядерного превращения.

Происхождение концепции изотопов

А теперь обратимся к упрямому миру различных фактов и рассмотрим, как впервые возникла концепция изотопов.

Если по традиции начать с цитаты из Библии, то мы выбрали бы следующую: «По их плодам я узнаю их», хотя до сих пор никто из читателей не догадался, что эти слова касаются не только деревьев и людей, но и элементов (от латинского *elementis*, т. е. l, m, n — азав алфавита веществ). Любое другое определение было бы сейчас затруднительным.

В 1905—1907 гг. — сначала с Рамзаем в Лондоне, а затем с Резерфордом в Монреале — работал юный стажер-исследователь

Отто Ган — тот самый, который тридцатью годами позже сделал потрясающее открытие, впервые установив, что атомное деление является новым типом распада атомов. Как раз в 1905 г. в цейлонских рудниках был открыт новый минерал — торриант (содержащий одновременно торий и уран), и несколько центнеров его было послано в Великобританию для научных исследований (по случайному совпадению, геолог, пославший эту партию торрианита, стал потом директором Итон-колледжа). Вследствие редчайшей, если не единственной ошибки в академическом немецком руководстве по химическому анализу в первых пробных анализах торий в минерале был принят за цирконий, и, прежде чем ошибка была раскрыта, большое количество присланного минерала успели обработать на заводе, используя методы получения радия, разработанные Марией Кюри. Интересно также отметить, что в действительности никакой ошибки не было, поскольку, как мы теперь знаем, совершенно идентичные методы применяются для выделения радиоактивных компонентов из торневых и урановых минералов. Но вместо ожидаемого воспроизведения всех результатов Марии Кюри оказалось, что из-за наличия тория имеют место параллельные процессы. И хотя смесь радия и тория пытались разделить обычным путем, высокоактивные компоненты концентрировались не с менее растворимыми фракциями, а на обоих концах фракционирования, в то время как барий оставался неактивным в средних фракциях.

Радиоторий

В процессе этой работы из фракций бария и радия был очень легко выделен новый радиоэлемент, который был назван радиоторием, так как, даже будучи выделен в незначительных количествах, он явно принадлежал к ториевому ряду, образуя при распаде торий-Х, эманацию тория и т. д., точно так же, как и сам торий. Только что полученный из раствора путем осаждения аммиаком (в присутствии следов элемента-носителя для образования весомого осадка) радиоторий испускает лишь α -частицы; но по мере образования тория-Х быстро появляются два других излучения, при этом γ -излучение тория-Х обладает несколько большей проникающей способностью, чем γ -излучение радия, превосходя в этом отношении все естественные радиоэлементы. Ясно, что в радиоактивном ряду тория радиоторий оказался новым членом, занявшим место между торием и торием-Х, — а ведь в 1901 г. Резерфорд и автору так и не удалось отделить торий-Х от тория! Поразительно, какими несведущими химиками оказались мы тогда!

Поскольку торий, как химический элемент, имел важное промышленное значение (например, его применяли при производстве газокалпльных сеток), многие химики, естественно, стали пытаться

из соединений тория выделить радиоторий. Средний период полураспада радиотория близок к двум годам, так что в течение этого времени данный радиоэлемент представлял бы для исследователей такую же ценность, как и дорогой радий. Но здесь была повторена наша ошибка. Пока еще ни один из химиков не может отделить радиоторий от тория, так как эти радиоэлементы химически идентичны или, как мы теперь говорим, являются изотопами, хотя их атомные массы различаются на четыре единицы, ибо атом тория при первом акте распада теряет массу α -частицы.

Мезоторий

Первыми, кто отважился неудачу такого разделения приписать скорее естественной невозможности, чем некомпетентности ученых, были Мак-Кой и Росс — два американских химика, в 1907 г. правильно объяснившие причину легкого отделения радиотория Ганом и Рамзаем. Но перед этим Ган, будучи уже в Монреале, обнаружил, что в менее растворимых фракциях дробных перекристаллизаций вместе с радием (образующимся, конечно, из урана, присутствующего в исходном тораните) содержится неизвестный радиоэлемент, при распаде которого и образуется радиоторий. Ган назвал новый радиоэлемент мезоторием. Стало ясно, что мезоторий является новым промежуточным членом между торием и радиоторием. В действительности оказалось, что существуют два мезотория. Среднее время жизни первого — около 10 лет; путем низкоэнергетического β -распада он переходит во второй, среднее время жизни которого составляет около 9 часов. Таким образом, можно считать, что для многих промышленных нужд оба мезотория представляют собой как бы одно целое. Излучение мезотория-2 состоит из β - и γ -излучений, обладающих меньшей проникающей способностью по сравнению с излучением радия. Но с течением времени радиоторий, по мере его образования, оказывается практически носителем всей радиоактивности тория в минерале. Мезоторий является ценным заменителем радия; в смеси с сернистым цинком он применяется преимущественно в производстве светящихся циферблатов часов и других приборов, поскольку средняя продолжительность жизни радиоактивных веществ подчас больше, чем срок действия фосфоресцирующих материалов, содержащих сернистый цинк.

Анализ продуктов распада

Мак-Кой и Росс первые указали, что Рамзаю и Гану, работавшим с растворами торанита, вовсе не удалось отделить радиоторий от тория, ибо теперь, как и раньше, осуществить такое

отделение было бы невыполнимым подвигом. Но так как заводские операции разделения радиоактивных изотопов протекают медленно, у выделенного с радием мезотория было достаточно времени для образования радотория, и этот новый радиоэлемент был выделен Рамзаем и Ганом из мезотория и радия, а не из тория. Никогда еще столь долго хранимая тайна природы не была раскрыта столь изощренным способом. Действительно, торий превращается в свой изотоп через промежуточные члены ряда, которые могут быть отделены от тория, — и, таким образом, при спонтанном превращении радиоэлементов выявилась ранее абсолютно неожиданная форма неоднородности в I, п, п-алфавите вещества, обусловленная простой смесью двух или более химически идентичных типов вещества. Этот процесс можно назвать *трансмутационным анализом*, хотя, конечно, он лишь постепенно стал приобретать известность в мире химии.

Уже было упомянуто, что если быть до конца точным, то три естественных радиоактивных ряда включают в себя около 35 отдельных превращений и столько же различных видов атомов. По мере того как они открывались, оказывалось, что новые члены рядов были не химически новыми элементами, подобно полонию, радью и актинию, а изотопами общих элементов. Так, радиосвинец или радий-D — прямой предшественник полония — является, как говорит его название, химически подобным свинцу; ионий — непосредственный предшественник радия — подобен торью и т. д. «Развязка» наступила в 1910 г. Коммерческая ценность мезотория заставила засекретить методы его промышленного выделения. Марквальд в Германии и автор, тогда работавший в Глазго, пытались отделить мезоторий от радия, но неудачно. При тщательной дробной перекристаллизации автор установил отсутствие малейшего изменения в отношениях между двумя радиоэлементами, хотя барьер может полностью выделиться, что фактически и происходит. Этим и объясняется упомянутый факт, что для выделения радиоэлементов из минералов пользуются одним и тем же способом, независимо от того, содержат они уран и торий отдельно, или оба элемента вместе.

Закон радиоактивных смещений

В 1911 г. автор сделал первый шаг к формулировке закона радиоактивных смещений, с помощью которого в итоге был расшифрован периодический закон. Испускание α -частицы приводит к смещению радиоэлемента на два места влево в периодической системе (в направлении уменьшения массы). Но прохождение радиоактивных рядов через периодическую систему не прямолинейное, а зигзагообразное, так что превращающийся радиоэлемент часто возвращается назад — на то же место, которое занимал ранее в

периодической системе его материнский продукт. Когда это происходит, то оказывается, что материнский радиоэлемент и его последующий продукт распада — изотоп (занимающий то же самое место в периодической системе) имеют одинаковые химические свойства, несмотря на различие в их атомных массах. β -Излучатели, большинство из которых имеют очень короткие периоды полураспада, не были тогда еще достаточно химически изучены, и поэтому некоторым из них фактически были приписаны ошибочные химические характеристики.

Тогда автор попросил Александра Флека, своего ассистента на кафедре физической химии университета в Глазго, провести тщательную перепроверку всех сомнительных случаев, когда можно было предполагать наличие нескольких сходных радиоэлементов, насколько такую перепроверку позволяло провести время жизни последних, а затем посмотреть, можно ли отделить эти радиоэлементы друг от друга. Понятно, что для такого исследования понадобился определенный срок. Случилось так, что полученные Флеком данные стали хорошо известны некоторым из работавших в области радиохимии задолго до того, как они были опубликованы, благодаря совершенно свободному обсуждению в лаборатории результатов, полученных прежними и нынешними стажерами. Так, некоторые из них, кроме Флека, способствовали полной формулировке закона радиоактивных смещений, что стало очевидным весной 1913 г. Это А. С. Рассел, бывший стажер лаборатории автора, и Г. Хевеши (в то время оба они работали в лаборатории Резерфорда в Манчестере), а также Казимир Фаянс из Карлсруэ (Германия) — большой специалист в распутывании радиоактивных вилочек в активных осадках. Оба последних исследователя специализировались по изучению электрохимических свойств радиоэлементов, которые, однако, не всегда верно отражали подлинную их химию.

Интерпретация периодического закона

Закон радиоактивных смещений в его законченной формулировке оказался чрезвычайно простым и не допускающим никаких исключений. Он стал подлинным фундаментом рассмотренной ниже ядерной теории. Согласно этому закону, испускание β -частицы ведет к смещению радиоэлемента на одно место вправо в периодической системе, а испускание α -частицы — к смещению радиоэлемента на два места в обратном направлении. Поскольку многие α -распады сопровождаются двумя последующими β -распадами, то в таких случаях третий продукт распада всегда возвращается — на фоне периодической системы — на место исходного α -излучателя, являясь химически тождественным с ним, несмотря на разницу в четыре единицы в их атомных массах. В 1913 г. автор назвал их *изотопами* или *изотопными элементами*; этот термин означает,

что они занимают одно и то же место в периодической системе. Изотопы* двух разных элементов могут иметь одинаковую атомную массу, и тогда их называют *изобарами*. Реже изотопы одного и того же элемента могут иметь одинаковую атомную массу, но разную стабильность, т. е. один из них радиоактивен, а другой — нет. Такие изотопы называются изобарными изотопами**, один из примеров которых упомянут в конце этой главы.

Поскольку α -частица обладает зарядом в две положительные единицы, а заряд β -частицы равен единице со знаком минус, то сразу стало очевидным, что периодический закон отражает связь между химическими свойствами и внутриатомным зарядом, но не массой. В настоящее время периодический закон является *in extenso* (повсюду) выражением, во-первых, атомной (дискретной) природы электричества и, во-вторых, нового вида атомистики; об этом будет идти речь ниже, когда мы будем рассматривать расшифровку Бором атомных спектров. Фактически первая гипотеза, что разница во внутриатомном заряде на одну единицу отражает последовательность размещения в периодической системе, была выдвинута А. Ван ден Бруком в 1911 г., но она была выражена несколько туманным языком и в сочетании с совершенно нереальной попыткой разместить многочисленные радиоэлементы в когда-то предложенную Д. И. Менделеевым кубическую форму периодической системы с ее 120-ю местами; таким образом, согласно Ван ден Бруку, изотопы занимали разные места в системе.

На рис. 43 представлена первоначальная попытка автора сформулировать в 1913 г. закон радиоактивных смещений. По вертикали отложены единицы атомной массы, по горизонтали — последовательные места в периодической системе, от последнего — урана (справа) до таллия (слева), характеризующиеся в настоящее время атомными номерами: уран — 92, таллий — 81. Это порядковые номера элементов в периодической системе, начиная от водорода ($Z - 1$), гелия ($Z - 2$), лития ($Z - 3$) и т. д. Порядковый номер элемента Z равен также заряду ядра (числу положительных единичных зарядов в атомном ядре) и числу отрицательных электронов, окружающих ядро. Однако в указанной диаграмме до того, как был точно выяснен смысл порядкового номера элемента, использовалось представление об относительном числе электронов. Детали этой диаграммы, взятые из доклада, прочитанного на заседании секции В (химия) Британской ассоциации в Бирмингеме в 1913 г., следовало бы сопоставить с данными полной (для настоящего времени) схемы на с. 146—149.

Эта схема суммирует в достаточно сжатой форме наши нынешние знания о трех природных радиоактивных рядах. Верхняя

* В данном месте правильнее было бы употребить термин «нуклиды». — *Прим. ред.*

** Речь идет об *изомерах*. — *Прим. ред.*

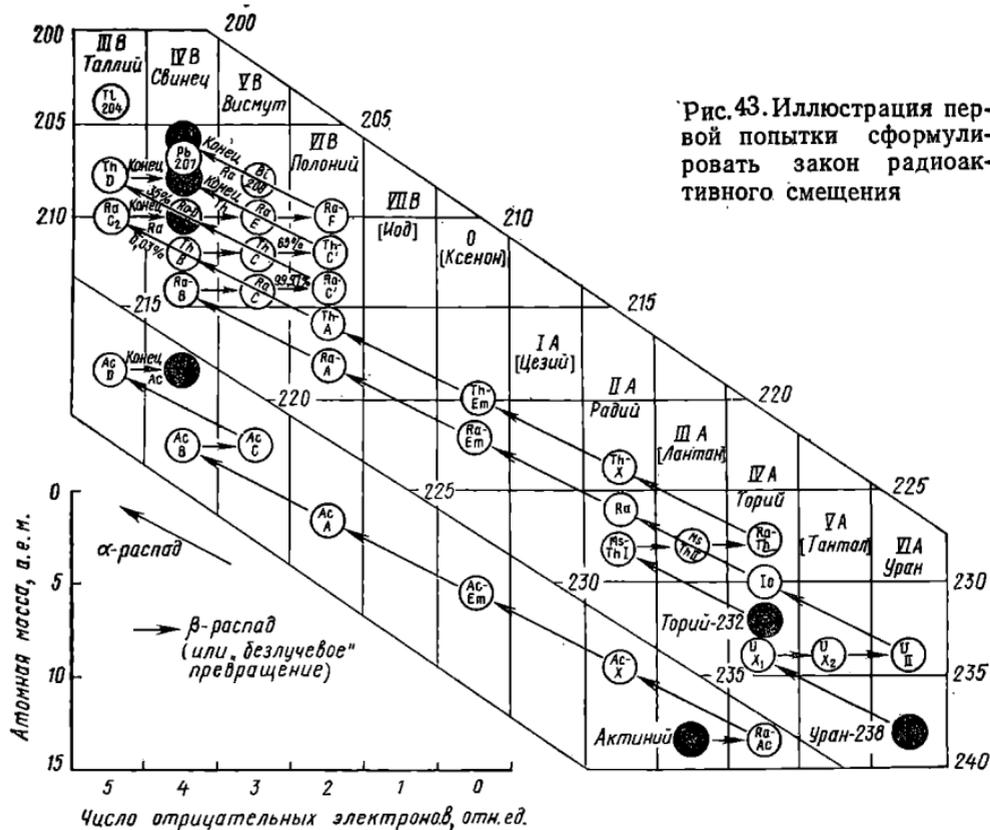


Рис. 43. Иллюстрация первой попытки сформулировать закон радиоактивного смещения

строка предназначена для обозначения номера группы в периодической системе, следующая — порядкового номера радиоэлемента в периодической системе, затем следует строка с обозначением среднего времени жизни радиоэлементов; наконец, в последней строке приведены массовые числа (т. е. атомная масса, округленная до ближайшего целого значения). Химически инертные эманации делят каждый ряд на две части: это удобно для выявления аналогий между последовательно расположенными членами рядов. Символ (β) означает очень «мягкий» β -распад с такой же проникающей способностью β -частиц, как и α -частиц. Случай наличия двух изомеров — урана- X_2 и урана- Z — уникален для природных радиоэлементов, но достаточно хорошо известен среди искусственных радиоэлементов. Н. Фезер объясняет причину различия между этими изомерами тем, что ядро первого из них находится в возбужденном состоянии. Однако 0,15% атомов перед распадом теряют свою избыточную энергию и возвращаются в основное энергетическое состояние посредством испускания кванта γ -излучения; при этом уран- X_2 переходит в уран- Z , распадающийся гораздо медленнее, чем уран- X_2 , но, по-видимому, образующий такой же продукт своего распада — уран-II. Н. Фезер доказал в 1947 г., что радий-Е, вероятно, образует радиоактивную вилку, где продуктивности каналов распада относятся друг к другу как 1 к 2 000 000. Очень интересное разветвление (с 0,5%-ным выходом) обнаружено у актиния; при этом новый радиоэлемент АсК занял до сих пор пустовавшее место № 87 и представляет собой высший аналог щелочных металлов, что было открыто М. Перей, ассистенткой в лаборатории профессора Жана Перрена в Париже (1939). Кроме упоминания об этих недавно полученных результатах мы не будем касаться темы множественного распада.

Исключения из периодического закона

Уже давно было известно, что существует три исключения в периодической системе, а именно: есть три пары элементов, которые размещаются в периодической системе обратно их атомным массам, что, казалось бы, противоречит занимаемым ими местам. Сначала это несоответствие было обнаружено у пары теллур — йод. Следующими двумя исключениями оказались кобальт и никель, затем аргон и калий; а теперь установлено и четвертое исключение — протактиний (231) и торий (232). Во введении было упомянуто, что на основе использования кислородной шкалы (^{16}O) удалось получить почти целочисленные атомные массы приблизительно для половины химических элементов с самыми легкими атомами, для которых, разумеется, ошибки определения пропорционально наименьшие. Эти элементы были сразу отнесены к чистым, или одноизотопным, а элементы, атомные массы которых пред-

ставляли дробные числа, — к смесям изотопов с разными атомными массами. Впервые это в косвенной форме предположили Д. Стрёмгольм и Т. Сведберг в 1909 г. и блистательно подтвердил Ф. Астон после первой мировой войны. Этот результат способствовал воскрешению гипотезы Праута в новой форме, а открытие нейтрона в 1932 г. нанесло смертельный удар электрической теории материи, господствовавшей в первом десятилетии XX в., хотя она и сыграла важную, почти фундаментальную роль в признанной теперь теории атомной структуры.

Предсказания на основе закона радиоактивных смещений

Теперь рассмотрим наиболее важные предсказания на основе закона радиоактивных смещений, которые были в свое время проверены и сразу получили экспериментальное подтверждение. Во-первых, открытый В. Круксом уран-Х, испускающий только β -частицы, должен был, подобно мезоторию, претерпевать два последовательных β -распада. Эта идея представляла значительный интерес, так как при первом распаде уран-Х переходит с места, занимаемого торием, на пустое место между торием и ураном. Наличие двух распадов было почти сразу установлено Фаянсом и Герингом, но уран-Х₂ был назван ими брeвием (breveium — краткий), поскольку имел период полураспада 1 мин.

Материнское вещество актиния: протактиний

Второе предсказание касалось радиоэлемента, предшествовавшего актинию; этот радиоэлемент должен был быть изотопом радия, если актиний образуется в результате β -распада, но если он образуется при α -распаде, то материнский радиоэлемент должен быть уже упомянутым недостающим элементом между торием и ураном. Первую возможность автор сразу же отверг путем испытания старого препарата радия Гизеля, который хранился в неприкосновенности с момента его приготовления и в котором актиний совершенно отсутствовал. Затем Дж. А. Крэнстон изучил вторую, более интересную возможность поиска нового радиоэлемента с применением брeвия в качестве меченого атома. Уже после моего отъезда в Абердин в 1914 г. оказалось, что в полученных таким способом препаратах продолжал образовываться актиний, т. е. предсказание подтвердилось. Этот элемент был одновременно открыт О. Ганом и Л. Мейтнер в Берлине и назван ими *протактинием*; позднее они выделили его из большого количества отходов от получения радия из смоляной обмайки.

Оказалось, что этот элемент испускает только α -излучение, а период его полураспада составляет около 30 000 лет. Он представляет интерес как единственный из новых радиоэлементов, который наряду с радием можно выделить в химически чистой форме. По своим химическим свойствам он очень похож на тантал, но был виртуозно отделен от этого элемента Гроссе. Однако, несмотря на то что срок его жизни в 20 раз больше, чем радия, содержание его в урановых минералах ничтожно мало, так как он является продуктом распада не главного изотопа урана-238, а урана-235, присутствующего в количестве менее 1% и названного — до того как его существование подтвердилось — актиноураном (о нем еще будет сказано ниже). Это изотоп урана, теперь более известный под названием уран-235: ведь именно благодаря ему стало возможным создание атомной бомбы...

Изотопы свинца

Третье предсказание, казавшееся наиболее важным из всех, состояло в том, что конечными продуктами урана и тория должны были быть два разных изотопа свинца с атомной массой 206 и 208, тогда как атомная масса обычного свинца равна 207,2. Это противоречило мнению геохимиков тех лет, которые считали, что только уран ответствен за образование свинца во всех урановых минералах. Окончательно подтвердить гипотезу изотопов оказалось возможным путем фактического получения двух разных видов свинца разной атомной массы. Кроме того, поскольку изотопы различаются только ядрами, окруженными одинаковой электронной оболочкой, плотность свинца обоих видов должна быть пропорциональна атомным массам.

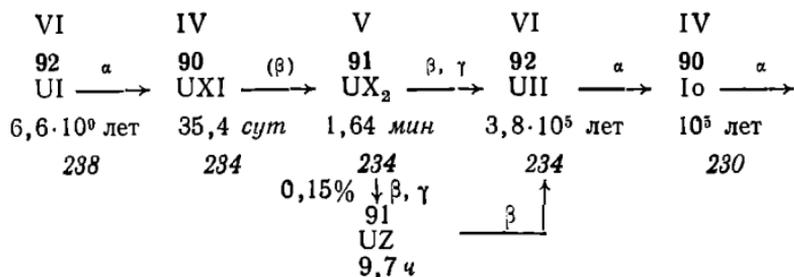
Что касается ториевого свинца, то автор в 1915 г. выделил его из цейлонского минерала торита—силиката тория, содержащего только малое количество урана; полученные образцы свинца имели атомную массу 207,7 — т. е. на 0,25% выше, чем у обычного свинца. Эта атомная масса была подтверждена Хёнигшмитом в одном из экспериментов в его лаборатории в Вене на таком же образце свинца, посланном ему автором. Хёнигшмит получил значение 207,77. В следующем году Фаянс получил несколько более высокое значение массы для свинца из норвежского торита, содержащего немного меньше урана, чем торит с Цейлона. Т. В. Ричардс в Гарварде, в то время самый авторитетный ученый в области измерения атомных масс, а также Хёнигшмит, один из учеников Ричардса, получили свинец с атомной массой почти точно равной 206 из некоторых очень старых урановых минералов, не содержащих тория, причем плотность этого свинца была меньше, чем обыкновенного свинца, в той же пропорции, в какой относятся друг к другу их атомные массы. Эти два изотопа свинца все еще

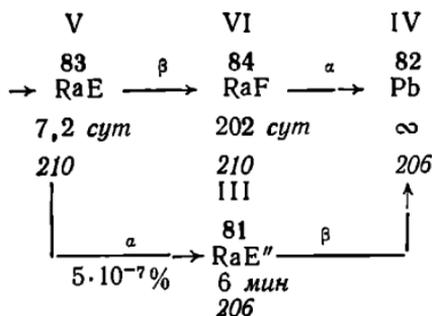
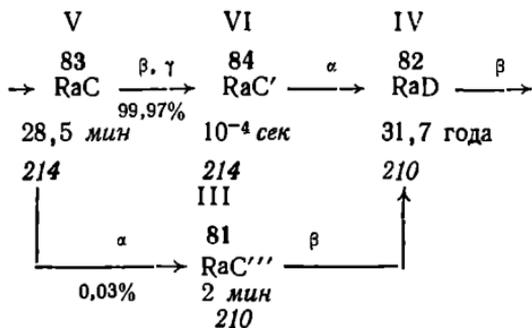
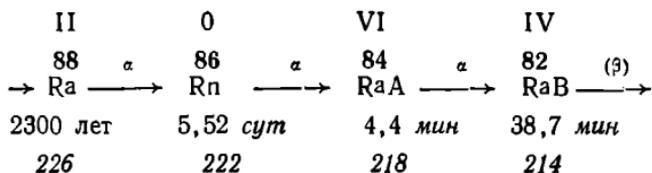
остаются единственными среди тяжелых элементов, полученных как химические индивидуальности, за исключением двух изотопов урана, на разделение которых во время второй мировой войны были затрачены сотни миллионов долларов. Это объясняется тем, что в течение геологических эпох они образовывались из двух разных элементов, тогда как изотопный состав всех других элементов постоянен и не зависит от источника или местности, откуда получен элемент.

Открытие закона радиоактивных смещений и соответствующая интерпретация периодического закона произошли одновременно с открытием Резерфордом атомного ядра, о чем пойдет речь в следующей главе. Все эти открытия предшествовали работе Н. Бора, ссылавшегося на закон радиоактивных смещений в своей первой статье на эту тему, а также работе Г. Г. Дж. Мозли, который распространил этот закон с помощью теории Н. Бора на остальные элементы. Таким образом, химия участвовала наравне с физикой в разработке основ нашего современного знания о природе материи. Фактически это была обдуманная и рассчитанная попытка извратить историю данной главы науки и показать, что Резерфорд, Бор и Мозли своей ядерной теорией структуры атома дали объяснение существования изотопов и интерпретацию периодического закона, тогда как в этой области теория дала лишь удовлетворительное объяснение известных фактов, которые сами по себе совершенно не зависят от какой бы то ни было теории атомной структуры. Новаторство этих ученых заключалось в признании атомного ядра как ключа к теории внутренней структуры атома и — заслуга Н. Бора — в интерпретации спектров. И лишь гораздо позже это объяснение было расширено, чтобы включить в себя особую форму периодического закона, с его последовательностью коротких, длинных и очень длинных периодов, уже рассмотренных в историческом введении.

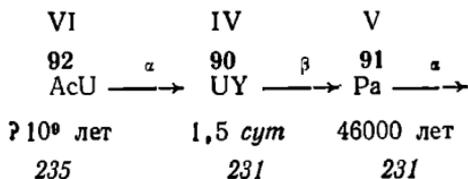
Три естественных радиоактивных ряда (1949)

1. Урановый ряд





2. Ряд актиноурана



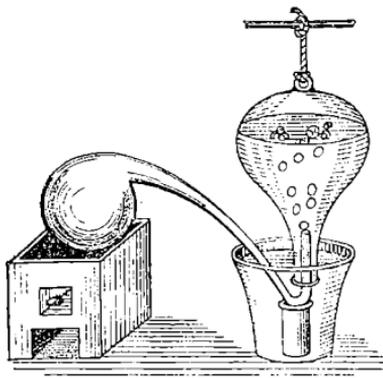


Рис. 4. Первый пневматический прибор для собирания газа Стефана Гейлса.

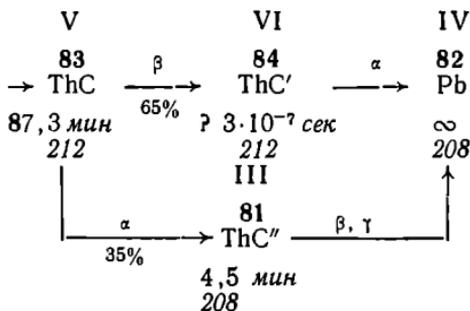
ло на теорию флогистона в ее первоначальном виде. Он также установил, что вещество, названное им «огненным», не имеет массы.

Фактически эта эпоха явилась полем боя двух идей, соревновавшихся за право на существование: идеи сохранения энергии и идеи сохранения массы. В наши дни, как мы увидим дальше, эти два закона сохранения были объединены Эйнштейном в один, и, хотя, может быть, неправомерно сказать, что энергия и масса идентичны, они все же взаимнообратимы. Мысль Штала о том, что свойство окисления обратимо, и можно добиться восстановления окислов, была достаточно ясной, хотя и несовершенной предшественницей закона сохранения энергии, который получил всеобщее признание только в середине XIX в.

Оставаясь до конца верными своим убеждениям, невзирая на очевидный перевес в сторону соперничающей точки зрения, флогистики первыми предположили существование совершенно новой категории в материальном мире, которая неосвязаема, невидима, невесома и которую, однако, невозможно ни создать, ни уничтожить.

Как утверждают более поздние историки, Лавуазье очень болезненно относился к блистательным экспериментам своих современников, стоящих на других позициях, а возможно, и ко всем открытиям, кроме собственных. Зачастую он не признавал первенства работ других ученых, даже если его лично знакомили с этими работами перед публикацией. В то же время известно, что нередко эти работы предвосхищали или непосредственно влияли на его выводы. Обращаясь с ними подчеркнуто пренебрежительно, он в то

шество с кислородом, любому человеку интересно знать, как получается свет и тепло в процессе горения. Именно для этого, а не для объяснения увеличения массы был первоначально придуман флогистон, который, кстати сказать, последователи Лавуазье окрестили в XIX в. «теплородом». По лаконичному выражению профессора Эдинбургского университета конца прошлого века Крума Брауна, — замени флогистон энергией, и работы флогистиков из алхимической чепухи превратятся в современную теорию. Хотя Лавуазье и доказал, что во время горения масса сохраняется, это никоим образом не повлия-



(Искусственный четвертый радиоактивный ряд нептуния на стр. 264)

Глава седьмая. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ И ЯДЕРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА

Период вплоть до начала первой мировой войны, освещенный в шестой главе, ознаменовался также открытием, сделанным Резерфордом и его сотрудниками, которое привело к констатации существования у атома центрального ядра ничтожных размеров, обладающего большим электрическим зарядом. Из этого открытия возникла современная теория структуры атома, называемого обычно *ядерным атомом Резерфорда — Бора*. Вклад Бора в первую очередь касался не ядра, а его электронного окружения, которое нейтрализует ядерный заряд, изучаемого, главным образом, спектроскопией, а также общей химией и физикой, в отличие от новых субатомных явлений, которые в основном и определяют тему последующих разделов. Наоборот, экспериментальное обнаружение ядра и понимание его таким, каким его представлял Резерфорд, вероятно, более чем любое другое открытие продвинуло вперед разработку главного направления, так как с течением времени именно оно открыло путь к искусственным превращениям элементов. Сделанное в тот же период, что и открытия изотопов и формулировка закона радиоактивных смещений, а также благодаря тотчас последовавшей за ними работе Бора по оптическим спектрам и работе Мозли по спектрам рентгеновского излучения, это открытие сразу же заставило весь мир физической науки, т. е. всех математиков, физиков и химиков, принять ядерную модель атома.

Для того чтобы обратиться к предпосылкам вклада Н. Бора в теорию, надо вернуться в еще более далекое прошлое, чем теория относительности, а именно к квантовой теории, выдвинутой в 1900 г. датчанином Максом Планком (он родился в Киле, когда тот еще принадлежал Дании). Эта теория содержала совершенно новую концепцию, которая помимо теории относительности и даже более решительно, чем она, демонстрировала, что законы классической динамики, если не подвергать их принципиальному усовершенствованию, в применении к миру быстро движущихся атомов и атомных масс или масс, на порядок меньших, приводят к полностью ошибочным выводам. Подобно теории относительности, она получила в первое десятилетие века всестороннее подтверждение самых разных ответвлений физической науки, хотя значение некоторых новых направлений, и притом важнейших, по достоинству оценено лишь теперь. Квантовая теория имеет дело с самыми типичными свойствами обычного вещества, однако по существу это скорее математическая, чем физическая теория, и до сих пор представляется в большей степени вспышкой блестящего вдохновения, чем логической дедукцией. Только позже, когда дело дошло до так называемого принципа неопределенностей Гейзенберга и волновой механики, она, подобно теории относительности, поначалу стала задавать метафизические головоломки. Теория относительности сначала казалась невероятной, но потом позволила узнать о реальной действительности то, о чем нельзя было и подозревать; квантовая же теория, наоборот, некогда дала объяснение большому количеству аномалий, однако теперь угрожала сделать непонятными самые привычные для нас явления.

Теория Планка сначала призвана была объяснить математические законы, связывающие световое и тепловое излучения с температурой, а именно связь обоих видов излучения с такими факторами, которые определяют количество и интенсивность излучаемой энергии, — как раз в этой области классическая динамика давала абсурдные результаты. Затем Эйнштейн использовал планковскую теорию для объяснения фотоэлектрического эффекта, состоящего в том, что свет, если длина его волны достаточно мала (т. е. достаточно высока частота), выбивает электроны из вещества. При этом ему удалось установить точное соотношение между длиной волны (или частотой) света и кинетической энергией выбитых электронов. Здесь теория семью годами ранее предвосхитила бытующий и поныне взгляд на природу рентгеновского и γ -излучения, рассматривающий их как свет с очень короткой длиной волны (высокой частоты), — взгляд, который был обоснован в 1912 г. в Цюрихе Лауэ, Фридрихом и Книппингом, а затем так превосходно развит в Великобритании сэром У. Брэггом и его

сыном У. Л. Брэггом, теперь сэром Лоуренсом Брэггом. Этого мы коротко коснемся в главе восьмой.

Начиная с 1911 г. Эйнштейн, Дебай и другие применяли квантовую теорию для объяснения исключений из закона Дюлонга и Пти (1819), утверждающего, что атомная теплоемкость элементов равна приблизительно шести. Известный физико-химик профессор Нернст со своими берлинскими сотрудниками, в числе которых был и Ф. А. Линдеман, ныне лорд Черуэлл, обнаружил, что теплоемкость твердых тел является правильной функцией температуры, определяемой единственной константой, характерной для данного материала. При очень низкой температуре теплоемкость совершенно исчезает. Для алмаза — материала, стоящего особняком от всех, — это происходит примерно при 20°K , но при несколько более низкой температуре то же имеет место и для остальных элементов. Как указывалось ранее, для всех элементов при достаточно высокой температуре атомная теплоемкость стремится к шести как в рамках квантовой динамики, используемой при низкой температуре, так и классической динамики — при высокой температуре. Этот факт хорошо иллюстрирует соотношение между двумя системами динамики. Бор и Мозли во второй половине 1913 г. воспользовались им, первый — для объяснения оптических спектров и второй — для объяснения спектров рентгеновского излучения, а в 1937 г. М. Поляnyi, работающий в настоящее время в Манчестерском университете, показал (на что в действительности задолго до этого указывал лорд Черуэлл), что в этом и состоял ключ к пониманию того, почему легкие изотопы, в особенности изотопы водорода, несмотря на полную идентичность их химических свойств, можно разделять физико-химическими методами. Однако, к сожалению, в двух словах вразумительно объяснить квантовую теорию даже труднее, чем теорию относительности.

Действие

Дело в том, что объяснить квантовую теорию невозможно без введения сложного специального динамического понятия *действия*, о котором немногие прежде слышали в этой связи, так что было бы целесообразно поэтому по-прежнему обозначать его заглавной буквой «*D*». Это странное произведение двух достаточно распространенных величин, как правило кинетической энергии и времени или импульса и длины; оно имеет физическую размерность ML^2/T . Действие стали применять потому, что вместе с кинетической энергией и импульсом оно оказалось одной из трех динамических величин, сохраняющихся в некоторой изолированной от внешнего вмешательства системе, как, например, Солнечная система, но в квантовой теории оно используется, по-видимому, более узко, чем, например, в одном из первых ее приложений, известном как *принцип наимень-*

шего действия Гамильтона. Однако все это уже заложено в приведенной выше величине с указанием размерности.

Проще всего представить *действие* как угловой момент, которым является, например, произведение массы, скорости и радиуса орбиты планеты. Одного только закона его сохранения недостаточно, чтобы отвергнуть предположенную Кантом оригинальную космогоническую теорию происхождения звезд. Наглядная иллюстрация к этому закону — вращение привязанного на веревке камня. Пусть человек одной рукой жестко удерживает веревку в центре вращения камня, а другой рукой подтягивает или отпускает ее, т. е. изменяет ее длину. При этом камень кружится быстрее, когда веревка укорачивается, и медленнее, когда удлиняется; произведение же скорости на длину остается постоянным. В этом случае кинетическая энергия камня возрастает в результате совершения над ним работы, когда он подтягивается ближе к центру вращения, и уменьшается, когда камень сам совершает работу, вытягивая веревку.

Сначала читателя должна насторожить явная несуразица, которая достаточно хорошо видна на примере движения планеты по круговой орбите. В качестве примера можно взять планету, поскольку и гравитационные, и электрические силы изменяются пропорционально квадрату расстояния, все равно, движется ли электрон вокруг положительно заряженного центра или планета вокруг Солнца. Законы Кеплера применимы к любой системе, лишь бы скорость планеты и, следовательно, ее импульс были обратно пропорциональны корню квадратному из радиуса вращения. Тогда кинетическая энергия будет обратно пропорциональна радиусу, в то время как период, или длительность года в случае материальной планеты, будет возрастать быстрее, чем уменьшаться кинетическая энергия, а именно, как корень квадратный из куба радиуса. Вследствие этого действие планеты, как оно определено выше, прямо пропорционально корню квадратному из радиуса и поэтому оно устремляется к бесконечности, когда радиус стремится к бесконечности, а скорость и кинетическая энергия становятся равными нулю! С приближением к центру — солнцу — действие становится меньше и меньше, тогда как скорость и кинетическая энергия возрастают, и равнялись бы нулю при нулевом радиусе, когда скорость и кинетическая энергия бесконечны. Но для любой орбиты, чтобы действие сохранялось, и скорость, и радиус не должны изменяться.

Говоря обычным языком, планета не может упасть на Солнце или стать к нему ближе, потому что, случись это, ее скорость и кинетическая энергия возросли бы в большей степени, чем это приемлемо для орбиты, на которую планета упала, создавая таким образом огромную центробежную силу, которая заставит планету вернуться туда, где она была. То же самое применимо в случае увеличения радиуса орбиты. Утечка кинетической энергии при дви-

женни против притяжения солнца вызвала бы слишком сильное замедление вращения, чтобы планета могла оставаться на более удаленной орбите, так как центробежной силы не хватило бы теперь для уравнивания центростремительной силы. Таким образом, планета вновь вынуждена вернуться на прежнюю орбиту. Однако также хорошо это можно объяснить, исходя из сохранения действия, хотя, как уже здесь отмечено, нулевая скорость предполагает бесконечное действие, а нулевое действие — бесконечную скорость. Это и есть несуразица, которая должна насторожить и новичка, и именно она обычно оказывается камнем преткновения в попытках придать квантовой теории какое-нибудь содержание, кроме математического. Между тем во всем этом есть кардинальный физический смысл, который проявится в скором времени.

Атом действия

Что такое квантовая теория Планка? В двух словах — это атомизация действия. Постоянная Планка, обозначаемая всегда буквой h , есть атом действия, разумеется, только в том смысле, как электрон можно назвать атомом электричества. Ибо это наименьшая инвариантная величина, на которую может измениться действие вращающегося тела, увеличиваться либо уменьшаться, и действие любого такого тела должно быть некоторым целым числом, кратным h . В настоящее время, благодаря установленной Н. Бором тесной связи со спектроскопией, это наиболее точно известная природная константа; по той же причине длины волн некоторых спектральных линий являются самими точными стандартами длины. В единицах СГС она равна $6,625 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек. Эта величина так ничтожно мала, что дает о себе знать только при атомных и субатомных движениях, для которых действие должно быть целым числом, кратным h . Она не нужна при равномерном прямолинейном движении, для которого еще справедлива классическая динамика, даже если речь идет о мельчайших частицах. Единственным типом движения, для которого действие атомизировано, является движение по замкнутой траектории, когда движущееся тело спустя некоторое периодическое время возвращается в исходную точку и движется в первоначальном направлении; это может быть либо вращение, либо осцилляция или вибрация. Чем короче время и выше частота, тем дальше от классической и ближе к квантовой динамике поведение движущейся частицы.

В планетарном атоме, простейшей иллюстрацией которого является электрон, вращающийся вокруг положительного иона водорода, действие, как было сказано выше, пропорционально корню квадратному из радиуса орбиты. Будучи наименьшим возможным действием согласно закону Планка, h , на основе кеплеровских законов, определяет и наименьший возможный радиус вращения.

При некотором меньшем радиусе, хотя кинетическая энергия и возрастает до бесконечности, когда радиус стремится к нулю, ее изменения все время недостаточно, чтобы соответствовать одному кванту действия, так что, вместо того, чтобы идти опосредованным путем, рассматривая планетарное движение, можно теперь рассматривать непосредственно сам атом. Это сразу объясняет самую великую тайну физики, а именно почему планеты не падают на Солнце и почему электрон и положительный ион существуют сами по себе и мгновенно не рекомбинируют, образуя нейтрон или другую нейтральную частицу.

Это объясняет также и другую аномалию. Позже мы увидим, что нейтрон потому настолько эффективней, чем α -частица, воздействует на ядро, вызывая его превращение, что у него нет заряда, так что положительное заряженное ядро не отталкивает его, как α -частицу. Однако, согласно этой логике, высокоскоростная β -частица должна воздействовать на ядро еще эффективней, чем нейтрон, хотя вплоть до последнего времени таких превращений не было обнаружено. Здесь, как и в случае атома водорода, не могут объединиться две противоположно заряженные частицы.

Quanta и «кванты»

Мы видим, что наряду с угловым моментом, или произведением импульса и длины, кинетическую энергию и время с не меньшим правом можно рассматривать как сомножители действия, считая время в данном случае периодом вращающейся частицы. Обратную его величину, или частоту, т. е. количество проделанных частицей за секунду замкнутых траекторий, всегда обозначают буквой ν . Поэтому чаще подобные явления описывают не на языке действия, а с помощью порций кинетической энергии $h\nu$. К сожалению, последователи Планка, начиная с Эйнштейна, ввели в обыкновение говорить о кванте энергии величиной $h\nu$. Следуя современным представлениям о свете как состоящем из некоторых дискретных порций, называемых корпускулами, или фотонами, они говорят, что свет состоит из квантов; однако теперь, хотя первоначально это принималось безоговорочно, такая формулировка приводит в замешательство даже опытных физиков, не говоря уже о том, что она искажает смысл. Дело в том, что квант h — это всегда константа, тогда как $h\nu$ — это непрерывная переменная, равная нулю при поступательном движении и беспредельно возрастающая с ростом частоты. Неправильное словоупотребление породило даже бредовую идею, что энергия (а не действие!) атомична (дискретна). В этой связи автор вместо слов «квант энергии» пользуется специальным словом «квант», обозначая им единичную порцию, как правило импульса или кинетической энергии, соответствующую кванту действия. Это наглядно проиллюстрировано позднее.

Попытка построить атом, подчиняющийся законам классической динамики, была одной из величайших помех на пути прогресса, ибо законы электромагнетизма в применении к планетарному атому требовали, чтобы электрон излучал свет из-за постоянного «ускорения» к центру атома. (Автор никогда не мог понять, почему математики столь некритично называют равномерное вращение по круговой орбите ускоренным движением, так же как качание маятника или вращение с переменной скоростью—ведь это просто смещение понятий пространства и времени!) Между тем мало в чем можно быть более уверенным, чем в том, что электрон при своем обычном движении в атоме не генерирует света, так как, если бы это имело место, утечка энергии вызвала бы нестабильность атома, а излучение не имело бы некоторой определенной частоты и длины волны, тогда как последние являются одними из самых фундаментальных мировых констант.

Масса усилий и изобретательности была затрачена на решение этой проблемы в попытках стабилизировать в рамках старой электрической теории вещества электронную систему, которую, как тогда предполагали, представляет собой атом. Известна была только отрицательно заряженная частица, электрон, и если считать, что его масса имеет электрическое происхождение, то на единицу атомной массы приходится примерно 1845 электронов. В самой ранней модели атома, фигурирующей в этой книге, модели сэра Дж. Дж. Томсона, нейтрализующий положительный заряд атома не дробился на элементарные заряды, а рассматривался как однородно заряженная положительным электричеством сфера, внутри которой движутся электроны, нейтрализуя свой отрицательный заряд, и которая, будучи скорее «рыхлой», чем плотной, не дает заметного вклада в массу атома.

Кроме того (что фактически явно противоречило его модели), Томсон первый выдвинул идею, которая способна объяснить внешнюю электронную структуру принятого сегодня ядерного атома и правильность которой подтвердил уже закон радиоактивных смещений.

Согласно этой идее, периодическая система отражает добавление одного за другим электронов к самому внешнему кольцу до тех пор, пока оно не заполнится; тогда начинается заполнение нового наружного кольца, и процедура повторяется. Это очень походило на периодический возврат элементов, вроде нот в музыкальной гамме, после прохождения некоторого ряда к повторению такого же ряда, в результате чего элементы группируются в семейства с одинаковой валентностью и сходной химической природой. Но это очевидным образом не согласовывалось с тем, что на единицу атомной массы приходится 1845 электронов.

Открытие атомного ядра

В 1904 г. японский ученый Нагаока предложил первую модель ядерного атома, согласно которой положительный заряд, уравнивающий отрицательные заряды электронов, сосредоточен в центре; однако из-за отсутствия каких-либо экспериментальных подтверждений и вследствие ее «нестабильности» в рамках классической динамики эта модель не была принята всерьез научным миром. В 1908 г. Гейгер и Марсден, используя сцинтилляционный метод регистрации отдельных α -частиц, показали, что при их прохождении через тонкие металлические фольги небольшая их часть отражается обратно (в случае платины примерно одна из 8000 α -частиц отклонялась больше чем на 90°). Это было важным открытием, которое дополнило первоначальное заключение Брэгга о том, что α -частицы следуют прямолинейно, проходя через атомы, оказавшиеся на их пути, как если бы атомов там почти не было. В следующем году опыты по рассеянию β -частиц веществом, систематически проводимые Кроузером, привели Томсона к выводу, что в его модели с диффузным положительным зарядом на единицу атомной массы приходится только три электрона.

В 1911 г. Резерфорд, основываясь на экспериментах по рассеянию α -частиц металлическими фольгами, проведенных Гейгером и Марсденом, выдвинул ядерную теорию атома. Он утверждал, что наблюдаемые большие отклонения α -частиц не могут получаться в результате накопления последовательных малых отклонений, а обуславливаются единичным столкновением. Для того чтобы так изогнуть траекторию массивной α -частицы, как это имело место, в атоме должен находиться гораздо более сильный заряд, чем в модели атома Томсона, и для случая атома золота Резерфорд оценил этот заряд примерно в $100 e$.

Небезынтересно также вспомнить, что несколько позже, в том же самом году, Дж. У. Никольсон, который в значительной степени превосходил теорию спектров Бора, предложил модель атома с радиусом центрального положительного заряда во столько раз меньшим радиуса отдельного электрона, во сколько последний легче атома. Тогда масса атома должна была найти объяснение в рамках электромагнитной теории массы. Но большую часть экспериментальных доказательств он извлекал из спектров элементов, которые, как тогда предполагалось, существуют на звездах и не известны на Земле; их называли короний, небулий и протофтор. Теперь ясно, что это было неправильно, так как соответствующие спектральные линии относятся к известным элементам, многократно ионизованным в специфических условиях звезд.

Следующий, 1912 г. стал свидетелем важного открытия, получившего свое выражение в так называемом *соотношении Гейгера — Неттола*, которое связывает скорость испущенной α -частицы со временем жизни испускающего радиоактивного атома, так что

если известна одна величина, то можно приблизительно оценить и другую. Скорость и пробег α -частицы — наименьшие для самых долгоживущих и наибольшие для самых короткоживущих α -излучателей; подобное соотношение, правда менее точное, было найдено и для β -излучателей.

Теперь мы подошли к 1913 г., когда все разрозненные данные вдруг соединились, чтобы сделать модель ядерного атома Резерфорда всемирно признанной. Резерфорд совместно с Гейгером, Марсденом и Неттолом опубликовал результаты исчерпывающих экспериментов по прохождению α -частиц через вещество, которые показывали, что наряду со слабым рассеянием всего пучка α -частиц (в конечном счете, несколько угловых градусов) из-за последовательных столкновений с очень легкими внешними электронами существуют единичные акты рассеяния, которые он связывал со случайным единичным столкновением α -частицы с ядром попавшего на ее пути атома. На рис. 44 показаны траектории α -частиц при разных углах касательного падения на центральное атомное ядро. Диаграмма взята из книги лорда Резерфорда «The Newer Alchemy» (Cambridge University Press, 1937 г.). Математическая теория прохождения α -частиц около тяжелого ядра выглядит точно так же, как теория прохождения кометы в перигее около Солнца, если не считать разницы в знаках полученных выражений, обусловленной тем, что в первом случае имеют место случаи отталкивания, а во втором — притяжения. Данные экспериментальной проверки зависимости угла рассеяния от таких параметров, как толщина пронизываемой металлической фольги, скорость α -частиц, атомная масса бомбардируемого металла, хорошо согласовывались с запланированными результатами.

Эти данные совпадали с результатами экспериментов Кроузера по рассеянию β -частиц в том, что, согласно последним, положительный заряд ядра и число электронов атома составляют примерно половину атомной массы. Однако Ван ден Брук показал, что соответствие между этими экспериментами даже лучше, если учитывать порядковый номер элемента, под которым он стоит в обычной периодической системе и который теперь принято называть *атомным номером элемента*. Этот номер равен примерно половине атомной массы для легких элементов, но затем пропорционально уменьшается до тех пор, пока не достигает

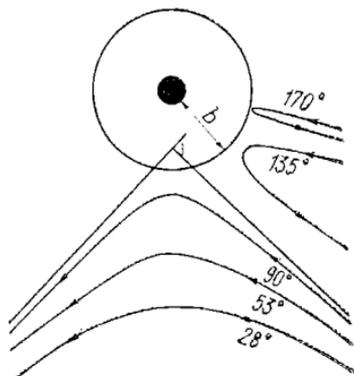


Рис. 44. Траектории α -частиц, пролетающих вблизи тяжелого ядра

0,4 для тория и урана. Но ни эта теория, ни то, что мы будем рассматривать теперь, ничего не говорили относительно атомной массы. Лишь с открытием изотопов и нейтрона стала понятна природа этой довольно-таки важной характеристики атома и, как будет видно из дальнейшего, все прояснилось.

Атом Резерфорда — Бора

На этой стадии датчанин Нильс Бор, работавший тогда в Манчестерском университете вместе с Резерфордом, применил к модели ядерного атома теорию квантовой динамики, что сразу же дало возможность связать постоянную Планка h с универсальной чисто экспериментальной константой, известной как *постоянная Ридберга*, которая фундаментально входит во все выражения, описывающие различные спектральные серии элементов. В свое время эти спектральные серии впервые начал успешно описывать Бальмер с помощью выражений, базирующихся на том, что позднее Ритц назвал комбинационным принципом.

Спектральные серии

Первым спектром, который Бальмер представил в 1885 г. в виде математического ряда, оказался обычный (для вакуумных трубок) спектр водорода. Но формула Бальмера для серии давала длины волн линий, тогда как более полезно перейти в ней к *волновым числам* ν_0 , которые являются величинами, обратными длинам волн, и равны числу полных волн на сантиметр. Волновое число ν_0 умноженное на скорость света c ($3 \cdot 10^{10}$ см/сек), дает частоту ν , или количество полных колебаний в секунду. Тогда формула бальмеровской серии принимает вид

$$\nu_0 = R (1/2^2 - 1/n^2),$$

где R — постоянная Ридберга, равная 109 678, а n — целое число, большее знаменателя впереди стоящего члена (в данном случае $n=3, 4, 5...$). Это дает волновое число каждой следующей линии спектра, начатой с его красной границы. Очевидно, что с ростом n последующие линии располагаются все теснее и теснее друг к другу и для данной бальмеровской серии пропадают при волновом числе, равном $1/4 R$. Оно отвечает центральной линии спектра, но обычно линии становятся неразличимыми уже дальше некоторой точки из-за их все убывающей интенсивности в направлении к фиолетовой границе. Первые четыре линии с длиной волны 6563, 4861, 4340 и 4102 Å (где Å — единица ангстрем, равная 10^{-8} см, которая в спектроскопии является единицей длины) соответственно впервые наблюдал Фраунгофер как темные линии поглоще-

ния в спектре Солнца; первые две он обозначил буквами *C* и *F*. При солнечном затмении 1898 г. были измерены 29 линий этой серии.

В 1904 г. наблюдалась первая линия другой водородной серии в ультрафиолетовой области, известной под названием *серии Лаймана*, для которой в приведенной выше формуле первое целое число 2 заменяется на 1, и волновое число первой линии, с $n=2$, равно, следовательно, $\frac{3}{4} R$, а головной линии R , что соответствует длинам волн 1215, 7 и 911,8 Å. В очень далекой ультрафиолетовой области спектра находится так называемая область Шумана; при соответствующих исследованиях в качестве линз и призм можно использовать только флюорит, а фотопластины не должны содержать желатин; кроме того, такие лучи надо исследовать в вакууме, поскольку в этой высокочастотной области свет уже начинает ионизовать газы как рентгеновское излучение и поэтому даже в них сильно поглощается. Полную серию, по аналогии с другими, предсказал в 1908 г. Ритц, а в 1915 г., после того как ее объяснил Бор, эту серию начертил Лайман. В 1909 и 1922 гг. были воспроизведены соответственно первая инфракрасная серия водорода, известная как *серия Пашена*, и вторая, известная как *серия Брэкетта*. В этих сериях целые числа в первом члене формулы равны соответственно 3 и 4. Это были серии, которые, применив квантовую теорию, с успехом объяснил Н. Бор, и, более того, он показал, что другая серия в звездном спектре, приписанная водороду, на самом деле была серией гелия, после чего ее сразу же получил в лабораторных условиях Фаулер. Эта серия наблюдалась в спектре звезд ζ в созвездии Гончих Псов.

Теория оптических спектров Бора

Как уже говорилось, Н. Бор «квантовал» орбиты, «разрешая» электрону вращаться (не излучая) лишь по тем орбитам, которые отвечают кванту действия h , $2h$, $3h$ и т. д., но, как правило, занимать первую, или № 1, орбиту. Точно так же как в фотоэлектрическом эффекте, свет достаточно высокой частоты выбивает из атома электрон с энергией, которая, согласно формуле Эйнштейна, равна энергии светового фотона минус энергия, необходимая для ионизации атома, т. е. энергия удаления из него электрона; в свою очередь, обратный процесс рождает свет. Электрон, вернувшись в ионизованный атом, вызывает эмиссию фотона определенной энергии, что дает одну линию в спектре, причем в полной ионизации нет необходимости. Предшествующее появлению спектральной линии *возбуждение* атома состоит в перемещении электрона с его нормальной орбиты № 1 на некоторую более высокую орбиту. Излучение спектральной линии происходит, когда электрон с некоторой внешней орбиты «прыгает» назад на какую-то внутреннюю

квантовую орбиту. Первое целое число в формуле для спектральной серии — это квантовый номер орбиты, на которую прыгает электрон, а второе число — квантовый номер орбиты, с которой он прыгает.

Так как количество орбит, соответствующих целоквантовому действию, бесконечно, возможное число спектральных линий равно уже квадрату бесконечности, или бесконечно бесконечному, хотя лишь немногие из прыжков дают линии с достаточной для наблюдения интенсивностью. Очевидно, бесконечное число теоретически возможных отдельных серий начинается с одной определенной точки спектра и затем последовательно серии продвигаются все дальше в инфракрасную область. Таким образом, от видимого света они переходят к инфракрасному, или тепловому, излучению, как серии Пашена и Брэккетта, затем к радиочастотам и т. д., причем такие низкочастотные волны было бы уже неверно называть спектральными линиями. Дело в том, что даже простейший из существующих атомов с одним электроном, вращающимся около единичного положительного заряда, теоретически может иметь бесконечно бесконечное число спектральных линий, но сложность спектра совсем не означает, как это кажется вначале, что структура атома «так же сложна, как устройство рояля».

Соотношение между двумя частотами

Для желающих пользоваться теорией Н. Бора на практике хорошими помощниками в знакомстве с ее хотя бы элементарным математическим описанием являются учебники*; однако основную ее суть можно выразить очень просто. Законы движения планет Кеплера и их ньютоновское обоснование, которое вытекает из наличия центральной гравитационной силы, создаваемой Солнцем и зависящей от квадрата расстояния до центра, были сформулированы задолго до появления современной концепции энергии, так же как и до появления более старого понятия действия. Но на языке энергии очень простой вывод из них состоит в том, что если планета спустится ближе к Солнцу, энергия, ставшая кинетической в результате падения, вдвое превысит ту дополнительную энергию, которая необходима, чтобы удерживать планету на этой, более близкой к Солнцу, орбите. В системе, изолированной от внешних воздействий, для материальной планеты нет способа избавиться от этого избытка кинетической энергии, но в случае приближения электрона к положительно заряженному центру атома этот избыток излучается в виде фотона с энергией $h\nu'$, где ν' — частота спектральной линии, излучаемой атомом в данном процессе. Это спра-

* Например, *The Structure of Matter*, Appendix, J. A. Cranston, Blackie, 1924. *Radioactivity*, G. Hevesy and F. Paneth, Chapter VIII, Oxford University Press, 1926.

ведливо, когда электрон перепрыгивает с более удаленной орбиты на более близкую, скажем с орбиты, соответствующей квантовому числу m , на орбиту с квантовым числом n , где m и n — целые числа и $m > n$. Другими словами, энергия излученного фотона равна разности кинетической энергии электрона при перемене им орбиты с m на n . Ее очень легко вычислить для одного частного случая, а именно когда электрон одним прыжком спускается на нормальную орбиту № 1 полностью ионизованного атома водорода, который обладает единичным положительным зарядом; тогда, как уже было установлено, излучается главная линия серии Лаймана с длиной волны $1/R$, или 911,8 А. При этом энергия соответствующего фотона равна кинетической энергии вращения электрона по орбите № 1. Это дает возможность легко вычислить радиус нормальной (№ 1) орбиты атома водорода с помощью постоянной Ридберга. Он оказывается равным $0,531 \cdot 10^{-8}$ см, что находится в замечательном согласии с диаметром атома водорода, полученным из многих экспериментальных данных и равным примерно одному ангстрему. Этот размер можно считать самой фундаментальной единицей длины во Вселенной. Вращаясь по этой орбите, электрон делает обычно около 600 миллионов оборотов в секунду.

Простой вывод формулы спектральной серии

Действие D (или nh , где n — целое число) равномерно вращающегося тела равно удвоенной кинетической энергии E , умноженной на период вращения $1/\nu$, т. е. $D = nh = 2E/\nu$. Если q_e — квант кинетической энергии, соответствующий кванту действия h , то $E = nq_e$, откуда $q_e = h\nu/2$. Переходя к угловому моменту, имеем $D = 2\pi mvr$ и q_m — квант количества движения, соответствующий h , равен $h/2\pi r$.

Для некоторой орбиты с действием nh и кинетической энергией $nh\nu/2$ радиус, по законам Кеплера, пропорционален n^2 , скорость $1/n$, кинетическая энергия $1/n^2$ и частота $1/n^3$, если рассматривать эти величины по отношению к самой близкой к центру орбите, для которой $n=1$. При переходе с внешней орбиты с квантовым числом m на внутреннюю орбиту с квантовым числом n кинетическая энергия изменяет свое значение от $m^2 h\nu_m/2$ до $nh\nu_n/2$, где ν_m и ν_n — частота на соответствующих орбитах. Но

$$\nu_m = \nu_1/m^3 \text{ и } \nu_n = \nu_1/n^3,$$

где ν_1 — частота на орбите № 1. Поэтому кинетическая энергия изменяется от $\frac{1}{2} h \frac{\nu_1}{m^2}$ до $\frac{1}{2} h \frac{\nu_1}{n^2}$, а ее прирост равен

$\frac{1}{2} h \nu_1 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$. Это есть также энергия, излучаемая в виде фотона частотой ν и энергией $h\nu$. Следовательно,

$$\nu = \frac{1}{2} \nu_1 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

где ν — частота спектральной линии, а ν_1 — частота электрона на нормальной орбите до возбуждения. Если $n=1$ и $m=\infty$, то $\nu = \nu_1/2$, т. е. частоте главной линии серии Лаймана $1/R$, которая равна половине частоты вращения электрона по его нормальной орбите.

Постоянная Ридберга

Выражение, полученное Н. Бором для постоянной Ридберга и дающее очень хорошее первое приближение, имеет вид

$$R = 2\pi^2 m Z^2 e^2 / ch^3,$$

где e — заряд электрона, m — масса электрона; Z — заряд центрального ядра (или атомный номер); c — скорость света; h — постоянная Планка; π — отношение длины окружности к диаметру. Небольшую поправку необходимо сделать для учета того обстоятельства, что электрон вращается не вокруг центра ядра, а вокруг центра инерции системы. Эта поправка для R делает теоретическое и экспериментальное значения R настолько близкими, что накладывает уже строгие условия на точность используемых значений других природных констант, входящих в формулу (e , m и h).

Следует особо отметить, что величина R пропорциональна Z^2 — квадрату центрального положительного заряда, который в случае водорода такой же, как у электрона. Н. Бору удалось спектральную серию звезды ζ из созвездия Гончих Псов, ошибочно приписанную водороду, правильно связать с гелием, так как величина R для нее оказалась в четыре раза больше, чем у водорода. Но отсюда вытекает и другое очень важное следствие. Z — эффективный центральный положительный заряд, так что неизвестный звездный спектр излучался дважды ионизованным атомом гелия или ядром гелия, объединившимся с электроном, в результате чего образовался однозарядный ион гелия. В случае образования нейтрального атома гелия при присоединении электрона к однозарядному атому гелия R имеет то же значение, что и для водорода, поскольку эффективный заряд равен единице, а не двум.

Вообще же в оптических спектрах R имеет примерно то же значение, что и для водорода в случае дугового спектра, поскольку его испускают однократно ионизованные атомы; в искровом спектре R в четыре, девять и шестнадцать раз больше, в зависимости от того, обусловлен спектр присоединением электрона соответственно к двух-, трех- или четырехзарядным положительным ионам. Это находит выражение в так называемом *спектроскопическом законе смещения*, который в соответствии с изменениями R устанавливает общую связь между дуговым спектром, скажем, натрия и пер-

вым искровым спектром магния, вторым искровым спектром алюминия и третьим искровым спектром кремния.

До того как была понята теория спектров, Норман Локьер считал, что эти *усиленные* линии, как их назвали после первоначального обнаружения в звездном спектре, а затем воспроизведения в искровом разряде в лабораторных условиях с включением в электрическую цепь лейденских банок для повышения температуры искры, указывают на эволюцию, которую претерпевают элементы при звездных температурах и которая состоит в конденсировании более легких элементов в более тяжелые. Между тем превращения, на которые указывает изменение характера спектра при переходе от пламенного и дугового спектров к искровому, как теперь известно, связаны с последовательными стадиями ионизации, когда при повышении температуры атомы все больше и больше теряют с наружных орбит электроны, и это не означает какого-то взаимопревращения элементов.

Дилемма физики

Боровская теория спектров, согласно которой свет излучается в виде дискретных порций, или фотонов, частотой ν и энергией $h\nu$, очевидно, реабилитировала старую корпускулярную теорию света Ньютона, считавшуюся в минувшем веке окончательно опровергнутой в пользу волновой теории экспериментами по дифракции. Однако довольно любопытно, что новая теория не вытеснила старую. По остроумному выражению сэра Уильяма Брэгга, мы должны думать о свете и других видах излучения как о фотонах по понедельникам, средам и пятницам и как о волнах — по вторникам, четвергам и субботам. В этом и состоит дилемма физики, хотя открытие позитрона и взаимосвязи пары позитрон — электрон с фотоном, которая будет позже рассмотрена, наконец подготовит почву для примирения обеих точек зрения.

Современные исследования показали, что различие между волнами и корпускулами оказывается призрачным, ибо частица обладает волновым характером, а волна имеет признаки частицы. Между тем здравый смысл подсказывает, что разница есть уже только из-за того, что, например, α - и β -частицы и рентгеновское γ -излучение по-разному проявляются в эксперименте, поэтому их с самого начала классифицировали соответственно как частицы и волны, что дает возможность различными способами пересчитывать в эксперименте первые в отличие от последних. С другой стороны, после того как дифракцию катодных лучей, т. е. излученных электронов, наряду с дифракцией рентгеновского излучения используют для изучения кристаллической структуры и подобных упорядоченных молекулярных структур (это будет обсуждено далее), наличие волновых свойств у частицы представляется в настоящее время само собой разумеющимся. Разница состоит лишь в том, что

из-за очень малой проникающей способности электронов возможности исследования в первом случае ограничены поверхностным слоем толщиной в несколько сот ангстремов.

В 1924 г. Луи де Бройль провозгласил, что все движущиеся частицы, и особенно электроны, обладают волновыми свойствами, и предсказал такую же, как у рентгеновского излучения, дифракцию катодного излучения. Более того, электрону теперь приписывают так называемую *длину волны де Бройля* λ , которая равна постоянной Планка h , деленной на импульс, т. е. $\lambda = h/mv$. Как правило, она меньше 0,1 Å и намного меньше обычной длины волны рентгеновского излучения, применяемого в тех же задачах. Даже нейтрон теперь отождествляют с волной, причем некоторые аномалии нейтронного поглощения связывают с увеличением его длины волны де Бройля при уменьшении скорости. В этом смысле фотон с энергией $h\nu$, или hc/λ , половина которой кинетическая, а половина — потенциальная, обладает импульсом h/λ и длиной волны $\lambda = h/mc$. Однако доказательство наличия у волны свойств частицы гораздо менее очевидно и убедительно.

Глава восьмая. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ И ХИМИЯ

Теперь нам необходимо кратко остановиться на успехах в выяснении природы рентгеновского излучения, достигнутых к 1912 г. Как уже говорилось, согласно эйнштейновской теории фотоэлектрического эффекта, рентгеновское излучение является электромагнитным излучением очень высокой частоты, поскольку оно выбивает из вещества электроны очень высокой кинетической энергии. Этот процесс (неожиданная обратимость!) в точности противоположен процессу возникновения рентгеновского излучения при бомбардировке вещества высокоэнергичными электронами. Кинетическая энергия обычных фотоэлектронов, вылетающих с поверхности электроположительных металлов таких, как магний, цинк и щелочные металлы, под действием лучей ультрафиолетовой области спектра и видимой области частот, составляет всего 1—2 эв, тогда как энергии электронов, выбиваемых рентгеновским излучением, достаточно для ионизации газов. Действительно, ионизация, производимая рентгеновским излучением, представляет собой побочный процесс, обусловленный электронами облучаемого газа, а не непосредственно самим рентгеновским излучением. Следует также сказать, что попытки измерить скорость рентгеновского излучения методом сравнения дали значение, равное скорости света, хотя сначала не видно было достаточных оснований считать этот факт бесспорным.

Дифракция рентгеновского излучения

Дифракционные решетки, применяемые вместо призм в спектроскопах для разложения обычного света на его составляющие с различной длиной волн, состоят из стеклянных пластинок, на каждом дюйме длины которых алмазом нанесено 20 000 штрихов, так как интервалы между штрихами должны быть того же порядка, что и длины волн составляющих. В 1912 г. у Лауэ появилась мысль использовать кристалл в качестве дифракционной решетки для рентгеновского излучения. Кристалл — это совокупность атомов или молекул, плотно упакованных в правильную трехмерную структуру, которая называется *пространственной решеткой*; расстояния между центрами атомов или молекул в решетке порядка одного ангстрема, т. е. 10^{-8} см. В первом опыте по проверке идеи Лауэ, поставленном Фридрихом и Книппингом с кристаллом сульфида цинка, на фотопластинке получился геометрический узор из черных пятен, означающий, что рентгеновское излучение, проходя через кристалл, как и предсказывал Лауэ, претерпевает дифракцию, словно на трехмерной решетке, собираясь в определенных направлениях в сильные пучки. На рис. 45 приведена первая фотография Лауэ дифракции рентгеновского излучения на кристалле сульфида цинка. Излучение направляли на кристалл толщиной 0,5 мм перпендикулярно к его поверхности и регистрировали на фотопластинке, расположенной параллельно грани кристалла. Черные пятна соответствуют направлениям, в которых лучи взаимно усиливают, а не ослабляют друг друга, а их расположение показывает, что данный кристалл обладает кубической симметрией.

Развивая это направление, отец и сын Брэгги разработали общий метод рентгеноспектроскопии, которая из-за использования кристалла в качестве дифракционной решетки совершенно аналогична спектроскопии оптической. Если известна архитектура какого-то кристалла, то можно сразу же в ангстремах определить длину волны рентгеновского излучения и, наоборот, имея рентгеновское излучение известной длины волны, можно получить в ангстремах масштаб всех трех измерений пространственной решетки. Для кристаллов с простой кубической решеткой, например каменной соли и сильвина (соответственно, хлористые натрия и калия), зная плотность и число Авогадро, этот масштаб можно оценить заранее; поэтому названные кристаллы и были использованы с этой целью первыми.

Так случилось, что хотя оба кристалла в действительности представляют собой две так называемые взаимопроникающие гранецентрированные кубические решетки, в которых атомы металла находятся в центрах шести граней куба, а атомы галогена — по углам, но из-за того, что атомные массы калия и хлора очень близки, а натрия и хлора различаются, сильвин ведет себя как простая кубическая решетка. Происходит это потому, что дифракционная

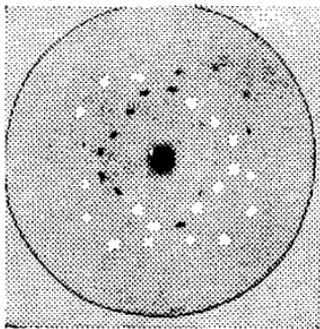


Рис. 45. Первая, полученная Лауэ фотография дифракции рентгеновского излучения кристаллом сульфида цинка

способность атомов является функцией атомной массы, и два типа атомов, попеременно занимающих углы каждого из восьми маленьких кубиков, на которые можно разделить взаимопроницающую гранецентрированную кубическую решетку, ведут себя почти одинаково по отношению к рентгеновскому излучению. На рис. 46 показана гранецентрированная кубическая решетка хлористого натрия. В решетке, неограниченно продолженной по всем трем измерениям, периодически встречаются два типа атомов. Когда атомные массы близки, как в решетке сильвина (хлористого калия), рентгеновское излучение не различает эти две их разновидности, и тогда диаграмма

представляет собой восемь соприкасающихся маленьких простых кубических решеток. Здесь каждый атом находится в симметричном окружении шести атомов другой разновидности.

Этот первый, почти случайный результат оказался в некотором смысле фундаментальным, поскольку показывал, что в данном классе «полярных» соединений решетку формируют атомы металла и галогена, а индивидуальные молекулы (NaCl , KCl) не существуют как таковые в кристалле, разве что, как уже отмечалось, в расплаве соли или в растворе. Любой атом каждой разновидности симметрично окружают шесть атомов другого типа, которые совершенно одинаковы во всех отношениях, так что ни один из атомов не обладает правом какого-то особого партнерства по отношению к центральному атому. Любопытно, что у хлористого цезия позже была найдена объемноцентрированная кубическая решетка, в которой атом одной из разновидностей расположен в центре куба, и восемь, вместо шести, атомов другой разновидности — по углам. На рис. 47 показана объемноцентрированная кубическая решетка хлористого цезия. Она состоит из единичных кубиков с атомами одного типа, расположенными по восьми углам, и одним атомом другого типа в центре, причем в продолженной решетке атомы обоих типов взаимозаменяют друг друга.

Метод рентгеноспектроскопии, собственно, предполагает использование в качестве дифракционной решетки кристалла с точно известной (в ангстремах) архитектурой, и это требование вполне удовлетворимо в случае простых кубических кристаллических систем. Здесь вновь неожиданно плодотворными оказались самые первые результаты Брэггов. В рентгеновских трубках они использо-

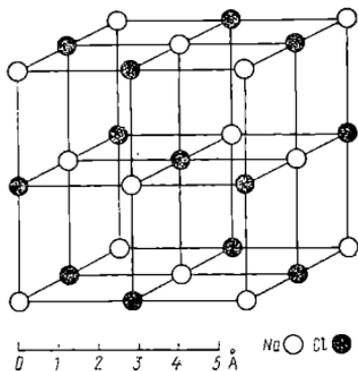


Рис. 46. Гранецентрированная кубическая решетка хлористого натрия

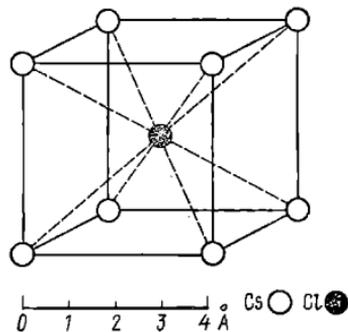


Рис. 47. Объемноцентрированная кубическая решетка хлористого цезия

вали в качестве материала для анодов два легких платиновых металла, родий и палладий, и обнаружили, что в обоих случаях рентгеновское излучение было практически однородным: каждый металл давал очень узкий дублет с длинами волн 0,612 и 0,616 Å у родия и 0,584 и 0,589 Å — у палладия. В периодической системе элементов эти металлы — соседние, № 45 и 46. Как показали более поздние исследования, кроме этих узких дублетов имеются еще и другие линии, но интенсивность их гораздо слабее.

Характеристическое рентгеновское излучение Баркля

До того как истинная природа рентгеновского излучения была столь изящно выявлена методом кристаллической дифракции, Ч. Дж. Баркля из Ливерпульского университета обнаружил, что если рентгеновское излучение достаточно высокоэнергично и проникающе, то при облучении им различных элементов оно способно возбуждать, как он выразился, характеристическое однородное вторичное рентгеновское излучение. Это значит, что вторичное рентгеновское излучение однородно по своей природе, или, как бы сказали оптики, монохроматично, и характеризует облучаемые элементы, но вовсе не первичное рентгеновское излучение, если не считать, что последнее должно быть более высокоэнергично, чем испускаемое вторичное излучение. Фактически это высокочастотный аналог флюоресценции, когда возбуждающее излучение как

правило должно иметь более высокую частоту, или более короткую длину волны, чем порождаемая им флюоресценция, но для рентгеновского излучения это совершенно обычное явление. Что касается характеристичности, то единственным ее критерием была высокоэнергичность рентгеновского излучения, или его проникающая способность, а однородность обеспечивала экспоненциальное поглощение в металлических экранах, так что коэффициент поглощения дает точную численную характеристику проникающей способности излучения.

Начав с алюминия, расположенного в периодической системе в области легких элементов, Баркла обнаружил, что вторичное излучение, генерируемое последовательно расположенными элементами, сначала столь длинноволновое, что прекрасно поглощалось даже в газах, постепенно становилось все жестче. При атомной массе от 100 до 110 оно делалось слишком жестким для того, чтобы его можно было считать самым жестким из полученного в то время первичного излучения. Однако перед тем как в спектре серебра завершалась эта первая серия, которую Баркла назвал *K-серией*, начиналась другая, названная им *L-серией*, излучение которой вначале было исключительно длинноволновым, но затем, как и прежде, постепенно становилось все более жестким. В этом случае серию можно проследить вплоть до самых тяжелых элементов. С тех пор были найдены серии с одними и теми же общими признаками, известные как *M*-, *N*-, *O*-... серии, каждая из которых последовательно, друг за другом, появляется в элементах периодической системы. Эти буквенные обозначения интересны теперь в том смысле, что они напоминают, каким образом впервые обнаруживали себя последовательные кольца или оболочки внешних электронов томсоновского атома и ядерного атома.

Закон Мозли

Работу Бора по оптическим спектрам дополнило исследование Г. Г. Дж. Мозли в Оксфорде рентгеновского излучения. Выпускник Оксфордского университета, химик по специальности, он работал у Резерфорда в Манчестере как стажер-исследователь. Вскоре после публикации своей работы по рентгеновскому излучению Мозли в возрасте 28 лет был убит в одном из сражений первой мировой войны близ местечка Савла Бэй, Галлиполи (Турция).

Мозли был одним из самых молодых ученых, когда-либо оставивших столь заметный след в истории науки. Он измерил длины волн основных линий *K*- и *L*-серий Баркля для последовательности элементов периодической системы и обнаружил, что общим правилом является постепенное уменьшение длины волны и увеличение частоты рентгеновского излучения при переходе от одной клетки периодической системы к другой. Диаграмма Мозли с рент-

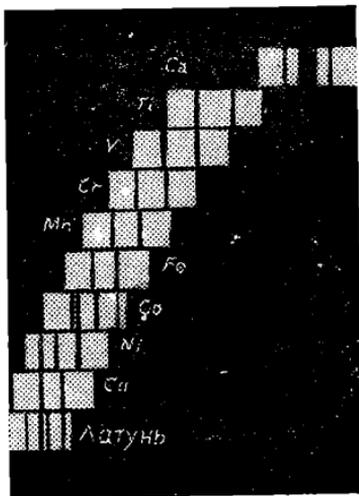


Рис. 48. Диаграмма Мозли рентгеновских спектров (*K*-серии) элементов от кальция до цинка

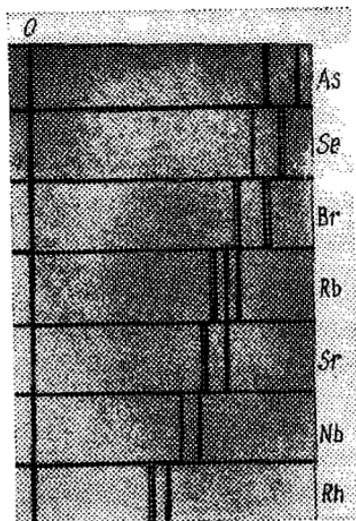


Рис. 49. Диаграмма Мозли рентгеновских спектров (*K*-серии) элементов от мышьяка до родия

геновскими спектрами (*K*-серия) последовательно расположенных элементов изображена на рис. 48. Видно, что частота излучения растет, а длина волны уменьшается в направлении справа налево; каждый элемент дает две линии, причем более яркая из них имеет большую длину волны; эта длина, в свою очередь, постепенно уменьшается при последовательном переходе от одного элемента периодической системы к другому. Скандий, между кальцием и титаном, пропущен, чем объясняется уменьшение длины волны вдвое при переходе от Ca к Ti, в спектре кобальта имеются линии никеля и железа; в самом нижнем спектре латуни видны линии меди и цинка. Рис. 49 иллюстрирует результаты позднейших аналогичных исследований для семи элементов между As и Rh включительно; линия, обозначенная как 0 и проходящая через все спектры, показывает положение недифрагированного пучка. На рис. 49 имеются пропуски, соответствующие одному элементу между Br и Rb, двум — между Sr и Nb и трем — между Nb и Rh.

Вторичное излучение Баркли дает самые настоящие рентгеновские спектры элементов, во всех отношениях аналогичные их оптическим спектрам. Кроме того, если распространить боровскую теорию спектров водорода и гелия на последующие элементы, то

постепенное изменение спектра от элемента к элементу можно связать с квадратом ядерного заряда, который равен порядковому номеру или, как теперь говорят, атомному номеру элемента в периодической системе. Это позволило экспериментально, путем измерения длины волны испускаемого элементом рентгеновского излучения, определить его атомный номер.

Здесь вместо перехода электрона, предварительно возбужденного, с какой-либо внешней орбиты на другую внешнюю орбиту, но расположенную ближе к центральному ядру (что объясняет все оптические спектры), имеет место переход электрона с более удаленной от ядра орбиты на более близкую, но лежащую внутри электронной структуры атома. *K*-серия — это результат перехода с орбиты № II *L*-оболочки атома на орбиту № I *K*-оболочки, в то время как *L*-серия обусловлена переходом с № III на № II и т. д. для других серий. Постепенное уменьшение длины волны происходит из-за увеличения на единицу ядерного заряда при переходе от одного элемента к следующему. Это подтверждало предположение Ван ден Брука, сделанное им в 1913 г., и распространяло на всю периодическую систему понятие атомного номера, первоначально введенное законом радиоактивных смещений для двенадцати мест в конце системы — от урана до таллия.

Для *K*-серии волновое число ν_K основной линии равно:

$$\nu_K = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) (Z - 1)^2 = \frac{3}{4} R (Z - 1)^2,$$

где Z — атомный номер элемента, а R — постоянная Ридберга. Поскольку речь идет о *K*-оболочке атома, то *L*-, *M*-, *N*-... электроны вне *K*-оболочки едва ли следует принимать в расчет, так как они почти симметрично распределены вокруг ядра и их влияние взаимно уничтожается. Эффективный ядерный заряд возбужденного атома, потерявшего *K*-электрон, равен $(Z - 1)$, так что частота почти точно пропорциональна $(Z - 1)^2$.

Для *L*-серии соотношение не является столь же простым и точным, как для *K*-серии, и имеет следующий приблизительный вид:

$$\nu_L = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) (Z - 7,4)^2 = \frac{5}{36} R (Z - 7,4)^2.$$

Здесь множитель $(Z - 7,4)$ можно рассматривать как средний эффективный заряд ядра атома, потерявшего один из восьми электронов *L*-оболочки; истинное его значение с увеличением Z слабо и монотонно изменяется.

Гафний и рений

Закон Мозли имел важнейшие последствия для химии, ибо он впервые дал возможность определить число элементов, указав положение пока еще свободных мест. В то время их насчитывалось шесть, включая № 91 — протактиний, открытый в 1918 г. (о нем мы уже упоминали). Что же касается пяти других элементов, то сейчас принято считать, что только два из них, а именно гафний и рений, стабильны, а остальные, вероятно, нестабильны. Главным недостатком периодической системы было то, что она не давала ключа к определению числа редкоземельных элементов. Закон Мозли только указывал, что клетка № 61 пока вакантна, а затем Бор, применив квантовую теорию для объяснения периодического закона, с определенностью предсказал, что клетка № 72, после лютеция (№ 71) — самого тяжелого из известных редкоземельных элементов, — не принадлежала редкоземельному элементу и ее «обитатель» должен был быть гомологом четырехвалентного циркония из IV группы.

Гафний был открыт в 1923 г. Костером и Хевеши, которые работали в Копенгагене, поэтому его и назвали древним именем этого города. Если бы не упомянутый недостаток системы, его открыли бы намного раньше, чем скандий, галлий и германий, потому что он является постоянным спутником широко распространенного циркония. Поэтому открытие гафния справедливо рассматривалось как величайший триумф боровской теории, описывающей внешнюю электронную структуру последовательности элементов периодической системы.

Интересно вспомнить*, что за первым же указанием на существование гафния немедленно последовало присуждение в Стокгольме Бору Нобелевской премии по физике в 1922 г. На другой день после вручения премии Бор должен был выступить со своей нобелевской речью, но в течение долгого времени держал аудиторию в ожидании, поскольку с минуты па минуту рассчитывал получить телеграмму из Копенгагена, подтверждающую открытие. Телеграмма, однако, не пришла. Если бы это случилось, то событие стало бы воистину столь же драматическим, сколь историческим. Обернулось же все забавным эпизодом. Когда оратор наконец появился, он был явно очень взволнован. Он начал рыться в карманах в поисках забытых им листков с тезисами речи, но вместо них вынул свою Нобелевскую премию в виде розовых шведских банкнот, которые публика, к вящему восторгу, тут же узнала, потому что это был цвет купюр высшего достоинства. Что же касается забытых листков с речью, то, как писали на другой день газе-

* Содди непосредственно наблюдал описываемое событие, ибо получил Нобелевскую премию 12 декабря 1922 г. — вместе с Бором, Эйнштейном и Астроном. — *Прим. ред.*

ты, «их отсутствие, кажется, не беспокоило оратора, так как речь продолжалась вместо одного часа почти два».

Рений в настоящее время также является досконально изученным элементом. В результате анализа рентгеновских спектров его в ничтожном количестве обнаружили Ноддаки и Берг в 1925 г. в рудах платиновых металлов и в минералах танталит и фергусонит. Его промышленное производство сразу взяла на себя фирма «Сименс и Гальске». Рений — это второй, более тяжелый, гомолог марганца, занимающий клетку № 75; по химической природе он аналогичен этому элементу. Одновременно было объявлено об открытии первого гомолога марганца в клетке № 43, которому преждевременно дали имя мазурий. Однако теперь считается, что он не только не был найден, но что вообще такого стабильного элемента не существует. Недавно, правда, были искусственно получены его нестабильные изотопы, так что химия этого элемента достаточно изучена. То же, по-видимому, можно сказать об элементах для других вакантных мест с номерами 61, 85 и 87; об открытии всех их неоднократно заявлялось, и каждый раз им давали названия. Но их существование в стабильном виде, очевидно, противоречит эмпирическому обобщению, известному как *правило Маттауха* (с. 236).

В природе существует 14 редкоземельных элементов. То, какую роль в окончательном выяснении этого факта сыграл закон Мозли, образно выразил в некрологе, посвященном Мозли, французский профессор Ж. Урбен — один из ведущих исследователей, работавших в утомительной и капризной области редких земель: «Итак, закон Мозли за несколько дней подтвердил результаты двадцати лет моего кропотливого труда».

Общие аспекты теории атомного ядра

Вряд ли имеет смысл слишком углубляться в первоначальные идеи о применении квантовой теории для объяснения спектров элементов, которые затем привели к использованию этой теории для детального объяснения периодического закона. Во-первых, данная работа в действительности имеет малое отношение к обычным химическим свойствам элементов и даже в спектроскопии черпает экспериментальные данные для развития квантовой теории, а не наоборот; поэтому спектроскописту она мало в чем поможет. Во-вторых, гораздо более общие соображения, чем те, что были постулированы первоначально, послужили обнаружению основных закономерностей периодической системы элементов.

Действительно, в ядерном атоме следует различать две области — внутреннюю и внешнюю, — которые разграничены обычно непреодолимым энергетическим барьером. Изменения во внешней электронной системе обратимы и относительно легко происходят,

причем соответствующих изменений в ядре они не вызывают, но зато обуславливают химические свойства элемента. Изменения ядра имеют характер трансмутации и необратимы. Если они произошли, внешняя система мгновенно приспосабливается к новому ядру и получается новый химический элемент со своими специфическими химическими свойствами. Если не считать каких-то чрезвычайных обстоятельств, то лишь в одном случае, а именно в недавно открытом K -захвате, пересекается граница, и вместо того, чтобы ядро изменялось само по себе, как в нормальном спонтанном атомном распаде, оно обнаруживает способность притягивать к себе электрон с ближайшей K -оболочки, уменьшая таким образом на единицу свой атомный номер; разумеется, этот процесс можно интерпретировать и как испускание позитрона.

Периодический закон с самого его возникновения, как и представлял сэр Вильям Крукс, стали безоговорочно считать как бы конспектом закономерного эволюционного перехода от одного элемента к другому, при котором каждый элемент наследует фундаментальную структуру своего предшественника. На языке квантовой теории это означает, что добавление к оболочке еще одного электрона при переходе от элемента к элементу оставляет нетронутыми на тех же квантовых орбитах электроны, до этого существовавшие в атоме (или, по более новым представлениям, их сферические волновые функции), хотя, разумеется, линейные размеры сокращаются пропорционально квадрату атомного номера, что описывается теоретической формулой Бора для постоянной Ридберга. Квантовые соображения, которые помогли объяснить спектральные серии водорода, необходимым образом расширенные, послужили для интерпретации всей периодической системы, в которой атом водорода можно фактически рассматривать как некий зародыш.

Вместо единственного электрона, способного в возбужденном состоянии атома водорода занимать различные квантовые орбиты, кратные нормальной, или первой, орбите, занимаемой им в невозбужденном состоянии, мы имеем количество электронов, равное атомному номеру, которые занимают в нормальном, невозбужденном, состоянии различные целочисленные квантовые орбиты. Термин *элементы правильной последовательности* будем применять по отношению к элементам, отличным от тех, которые называются переходными и редкоземельными элементами. Основное периодическое число 8, управлявшее периодичностью в двух коротких периодах, сменяется на 18 для двух длинных периодов, а затем на 32 — для самого длинного периода.

Согласно Бору, на протяжении этих периодов число электронов на самой внешней оболочке остается почти постоянным, обычно равным двум, хотя совсем немного элементов имеют на ней только один электрон, а палладий — ни одного электрона, в то время как ближайшая внутренняя оболочка заполняется электронами с 8 до 18. В случае редких земель заполняется (с 18 до 32

электронов) вторая от внешней оболочки; затем (с 8 до 18 электронов) соседняя с ней. Для элементов правильной последовательности лишь электроны внешней оболочки могут отрываться от атома и принимать участие в химических превращениях. Они и являются валентными электронами, переход которых от одного атома к другому находит выражение в химическом соединении. Кроме перечисленных исключений, все заполненные внутренние оболочки химически инертны, хотя, как уже было показано, под воздействием электронной бомбардировки электроны срываются и с них, а возвращение электронов на свое место в атомной структуре приводит к излучению рентгеновского фотона. Автора часто занимал вопрос, не может ли со временем развиться разновидность химии, промежуточная между обычной и ядерной химией, в которой эти внутренние электроны, вместо внешних валентных, обуславливали бы изменения в веществе, промежуточные между обычными химическими изменениями и ядерными превращениями. Однако пока никаких сообщений на этот счет не имеется.

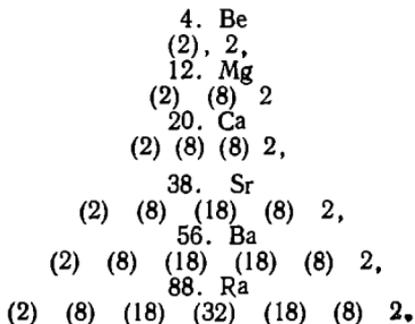
Статическая модель атома или кубический атом

Большое влияние на формирование нынешней квантовой интерпретации периодического закона имело установленное в 1914 г. Ридбергом любопытное соотношение, согласно которому атомные номера элементов группы VIII периодической системы определяются выражением

$$Z = 2(1^2 + 2^2 + 2^2 + 3^2 + 3^2 + 4^2),$$

если брать для соответствующих атомных номеров суммы одного, двух, трех и т. д., вплоть до шести, членов, т. е. получается 2, 10, 18, 36, 54, 86. Это просто математическая формулировка того известного факта, что последовательные периоды, включая водород и гелий, которые образуют первый период из двух элементов, состоят из 2, 8, 8, 18, 18, 32 элементов. Но есть свойство, которое данное соотношение скорее маскирует, чем обнаруживает, причем, по мнению автора, это, возможно, самое важное свойство во всем периодическом законе: его можно назвать *принципом симметрии*. Лучше всего оно может быть проиллюстрировано на примере щелочноземельных элементов группы II периодической системы, после которых начинаются отклонения от правильной последовательности и происходит построение внутренних оболочек. В этих элементах группы II порядок чисел электронов в последовательных оболочках, или кольцах, остается одинаковым независимо от того, как считать оболочки: от ядра наружу или в обратном направлении. Таким образом, заключая заполненные оболочки в скобки, так что

слева располагаются ближайшие к ядру, получаем для элементов группы II следующие атомные номера и электронные структуры:



Это показывает, что элементы правильной последовательности всегда имеют внешнюю заполненную оболочку из восьми электронов (ранее упомянутый октет). Именно на этой особенности базируется *статическая модель атома*, известная как *кубический атом Льюиса* и развита Ирвингом Ленгмюром в Соединенных Штатах Америки.

Полярные соединения

В этой модели атом представляет собой куб с центральным остовом и восемью электронами по углам; тогда химическое взаимодействие элементов правильной последовательности — расположенных с разных концов соседних периодов и демонстрирующих соответственно электроположительный, или основной, и электроотрицательный, или кислотный, характер — обеспечивается перемещением от остова первого атома избыточных электронов, которые заполняют вакантные углы еще не завершеного кубического остова второго. В данном контексте слово «остов» означает ядро и завершенные оболочки основного элемента, не включая его внешних валентных электронов, и ядро с завершенными оболочками кислотного элемента плюс заполненные электронами вакантные углы самой удаленной его оболочки. Иначе говоря, электронные системы двух остовов совпадают с предшествующим основному и следующим за кислотным элементом группы 0. Например, фтористый натрий состоит из достаточно обособленных остовов натрия и фтора, каждый из которых имеет электронную структуру неона. Но ядро натрия обладает на единицу большим положительным зарядом, чем неон, обуславливая, таким образом, появление положительного иона натрия, а ядро фтора несет на единицу меньше положительного электричества, чем неон, образуя, следовательно,

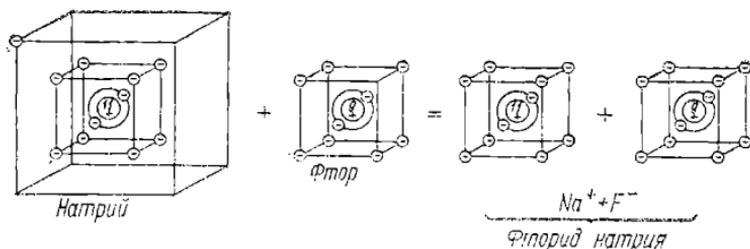


Рис. 50. Объединение полярных элементов по модели кубического атома

отрицательный ион фтора. Строго говоря, между двумя этими совершенно невалентными остовами нет никакого химического сродства. Они должны существовать в равных количествах из-за своих противоположных электрических зарядов, для того чтобы целое было электрически нейтральным.

Рис. 50 иллюстрирует объединение полярных элементов в рамках модели кубического атома. Видно, что в случае объединения щелочных металлов с галогенами никакого химического объединения нет, но противоположно заряженные ионы всегда должны существовать в одинаковых количествах, чтобы сохранялась электрическая нейтральность соединения. Оба иона — это инертные газы с избыточным зарядом ядра для щелочных металлов и с недостаточным — для ионов галогена.

Силы притяжения в полярных соединениях носят чисто электрический характер и имеют колоссальную величину. Миллиграмм ионов водорода H^+ обладает таким зарядом, что им можно наэлектризовать сферу размером с земной шар до потенциала 100 000 в. Если бы эти ионы можно было поместить в камеру так, чтобы они не отдавали заряда на стены, и если бы последние были такими же прочными, как современные крупнокалиберные пушки, то обоюдное отталкивание ионов разнесло бы эту камеру задолго до того, как в ней накопилось достаточно водорода для получения его спектра, как в вакуумной лампе. Все это удовлетворительно описывает тип химических соединений, называемых *полярными соединениями*; к ним относятся минеральные кислоты, основания и соли, и, как правило, они являются электролитами в расплавленном состоянии или в водном растворе.

Неполярные соединения

Между тем огромное большинство химических соединений не являются полярными и не проводят, находясь в жидком виде, электрического тока как электролиты. Эти соединения модель кубического атома описывает с помощью соответствующей перестановки

и перераспределения электронов, расположенных на внешних оболочках двух или более атомов (или групп атомов), которые объединяются таким экономным образом, чтобы заселить все вакантные углы соответствующих октетов. Получающиеся в результате остовы в этом случае связаны воедино. Такие соединения (их называют *неполярными*) делятся на два класса, хотя в некоторых очень интересных соединениях в одной и той же молекуле могут присутствовать одновременно полярные и неполярные связи, причем часто это порождает относительно редкое свойство, состоящее в том, что неорганические солеподобные соединения способны легко соединяться с органическими. Так, двуххлористая ртуть $HgCl_2$ образует жидкие комплексы с органическими растворителями, например с эфиром, потому что ее кристаллическая пространственная решетка составлена из слоев ионов ртути Hg^{++} , разделенных двумя смежными слоями ионов иода I^- . Связь между последними неполярная и принадлежит типу, к описанию которого мы теперь переходим.

Двухатомные газы являются простейшими из возможных примеров, а в качестве типичного для них можно взять фтор, F_2 . В результате соединения двух атомов фтора ребрами октетов вакантный угол каждого октета заселяется электроном другого октета. Таким образом, каждый атом в молекуле фтора совместно с другим атомом владеет электронной парой. Чтобы проще себе это представить, можно обозначить необобщенные электроны точками, а обобщенные крестиками; тогда объединение двух атомов фтора запишется так: $\cdot\ddot{F} + \cdot\ddot{F} = \cdot\ddot{F} \times \ddot{F} \cdot$. Однако таким способом можно изобразить только одинарные связи, вроде $F-F$. Двойные связи, как $O=O$, можно считать результатом присоединения двух кубов гранями друг к другу, но тройные связи типа $N \equiv N$ уже нельзя представить в рамках данной модели.

Мысль о том, что одинарная химическая связь может быть обусловлена электронной парой, в момент ее высказывания звучала довольно неожиданно, но затем она доказала свое фундаментальное значение для химии. Однако фигурирующую здесь электронную пару нельзя смешивать с более поздней и имеющей даже более фундаментальное значение электронной парой, которая связана с распадом фотона на позитрон и электрон и возникновением фотона в результате их рекомбинации. По этой причине последнюю пару, чтобы отличить ее от электронной, связанной с неполярными химическими соединениями, мы будем называть *электрон-позитронной парой*.

Молекулярные соединения и соединения Вернера

Что касается второй, незначительно отличающейся от первой, разновидности неполярных соединений, называемой *координационными соединениями*, то оказалось, что она включает самый много-

численный класс, который за отсутствием каких-либо подходящих объяснений в рамках ранее господствовавшего изображения валентности соединительными связями в свое время называли молекулярными соединениями. Самым наглядным их примером являются гидраты солей, в которых безводная соль кристаллизуется вместе с одной или несколькими, а часто со многими молекулами воды — с подобными соединениями мы уже встречались в случае изоморфных квасцов, в молекулу которых входит 24 молекулы воды; кристаллы обыкновенной стиральной соды $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ более чем на две трети состоят из воды. При этом, поскольку все соединительные связи уходят на образование безводной соли, объединение с водой приписывалось остаточному химическому или физическому притяжению между молекулами соли и воды.

Координационные соединения включают еще небольшой класс так называемых *соединений Вернера*, которые представляют собой молекулярные комплексы, формирующиеся по странным и прежде необъяснимым законам. Эти молекулярные соединения и комплексы в настоящее время трактуются как неполярные соединения, в которых, вместо того чтобы каждый участник вносил один электрон в электронную пару, оба электрона поступают от одного атома или группы; такой атом или группа атомов называется поэтому *донором*, а другой — *акцептором*. Для соединений Вернера, как правило, характерно наличие центрального атома, обладающего способностью соединяться с определенным числом (*координационное число*) каких-либо других атомов или молекул, способных к самостоятельному существованию. Это число обычно равно шести, но бывает четыре или, в разных случаях, восемь. Вернер утверждал, что для органических соединений исключения из привычных правил валентности так редки потому, что у атома углерода равны четырем и валентность, и координационное число. Возможность образования таких соединений связана с наличием объединяющихся групп одной или более так называемых неподеленных пар электронов, которые они отдают центральному атому или группе для заполнения электронного октета или какого-то большего четного числа состояний (до шестнадцати).

Соединение, кристаллизующееся с водой, возникает благодаря тому, что у воды есть две такие неподеленные пары, которые видны из формулы $\text{H} \times \overset{\times}{\underset{\times}{\text{O}}} \times \text{H}$. Аммиак NH_3 , который очень часто выступает в роли самостоятельной группы в соединениях Вернера,

обладает одной неподеленной парой $\overset{\text{H}}{\times \times} \times \overset{\times}{\underset{\times}{\text{N}}} \times \text{H}$.

Таким образом, статико-кубическая модель атома очень помогла в разрешении дотоле неразрешимых проблем, касающихся исключений из первоначальной простой теории валентности, основанной на понятии *соединительной связи*. Поначалу физики несколько

самоуверенно высмеивали эту модель, поскольку она явно противоречила динамическим принципам, однако со временем (о, превратности судьбы!) она отомстила за себя. Дело в том, что планетарный атом является грубым нарушением всех концепций химии и других им подобных, имеющих отношение к характеристикам строения вещества, в первоначальной точке зрения на которые, т. е. на архитектуру, конфигурацию и структуру составляющих вещество молекул, химии утвердились лишь в результате развития этих областей новым рентгеноспектроскопическим методом исследования. Вот именно те качества, которые больше всего интересуют исследователей, изучающих вещество, а вовсе не спектры, которые отражают скорее второстепенные электрические свойства, чем механические.

Периодический закон как следствие атомизации электричества и действия

С точки зрения квантовой теории периодический закон можно рассматривать как простое следствие совместной атомизации электричества и действия, хотя не существует, кажется, двух одинаковых мнений ни относительно того, как это происходит, ни относительно того, какой стоит за этим физический смысл, если есть вообще какой-нибудь смысл. Расчеты и обосновывающие их доводы варьируют от первого незрелого планетарного атома Бора через запутывающую псевдофизическую идентификацию частиц с волнами, или стационарными волновыми пакетами волновой механики, до чисто метафизического выведения всей квантовой теории, включая периодический закон, из принципа неопределенности Гейзенберга, основанного, так сказать, на сомнительном убеждении в том, что невозможность точного физического измерения связана скорее с изъяном природы, чем с неумением человека. Такой взгляд, подобно эйнштейновскому принципу эквивалентности массы и энергии, может быть или не быть правильным, но до тех пор, пока его не докажет эксперимент, он будет скорее опасной ересью, чем движением вперед, поскольку он полностью отрицает привычное соотношение между объективным и субъективным, т. е. между физикой и метафизикой, которое при зарождении науки помогло ускользнуть ей от демагогов.

Факты, которые следует объяснить, достаточно просты, если сжато представить их формулой Ридберга, а именно количество элементов в последовательных периодах равно соответственно 2, 8, 8, 18, 18, 32, что является рядом удвоенных квадратов натуральных чисел, для единицы взятых один раз, а для остальных чисел — дважды. Есть две отправные точки, которые принимаются всеми: это, во-первых, эмпирическое правило исключения, сформулированное в 1925 г. Паули и гласящее, что два электрона в возбужденном нормальном атоме не могут находиться в одном и

том же квантовом состоянии и, во-вторых, представление о том, что электроны обязаны пребывать в состоянии вращения, делающем их магнитами; при этом электронам, вращающимся в противоположных направлениях, произвольно приписываются разные квантовые состояния. Это-то и удваивает то количество элементов, которым оно должно было быть, если бы не электронный спин. Что касается второго удвоения в формуле Ридберга, то автор объясняет его чисто эмпирическим и уже упоминавшимся принципом симметрии, вынуждающим средние кольца, или оболочки, иметь наибольшее число электронов, а оболочки по обе стороны от последних — равные количества.

В отношении спина электронов экспериментальные результаты подтвердили предположение. Больше того, были открыты две разновидности водорода Н—Н, названные *орто* и *пара*, которые значительно различаются по теплоемкости, но способны к взаимному превращению. У первой разновидности спины двух электронов в молекуле можно представить направленными в одну сторону, а у второй — в противоположные. Другим примером является электронная пара, в которой предполагается, что спины двух электронов противоположно направлены, создавая таким образом магнитное притяжение, превышающее электростатическое отталкивание; в результате образуется пара и одинарная связь неполярных химических соединений. Но это, в свою очередь, явно не согласуется с существованием двух разновидностей водорода, в которых одинарная связь представлена электронами как с одинаково, так и с противоположно направленными спинами. Однако делать выводы на основании водорода, ограничиваясь только этой областью, рискованно, что с очевидностью следует из свойств тяжелого водорода.

Кроме спина, который иногда называют *четвертым квантовым числом*, возможны еще три типа различий, характеризующихся своими квантовыми числами. Согласно теории Бора, главное квантовое число в случае атома водорода имеет тот же смысл, что и количество квантов действия на круговой орбите. Так, для *K*-оболочки оно равно единице, для *L*-оболочки — двум и т. д. Второе квантовое число имеет отношение к эллиптичности возможных орбит, а третье — к трехмерной дифференциации, которая, вероятно, связана с ориентацией плоскости орбиты в пространстве. Вообще говоря, считают, что три квантовых числа связаны с тремя пространственными измерениями, в каждом из которых действие квантуется отдельно. С учетом всех четырех квантовых чисел квантовую теорию оказалось возможным приспособить для объяснения периодической системы, чтобы электроны один за другим входили в атомную структуру при соответствующем увеличении (каждый раз на единицу) центрального ядерного заряда.

Но с развитием современных представлений, приписывающих частицам характер волны и протекающих непосредственно из того

факта, что свет излучается в виде дискретных фотонов определенной энергии, которые столь неожиданным образом были открыты теорией Бора, электроны рассматриваются теперь волновой механикой не как частицы, вращающиеся по своим орбитам, а как круговые стоячие волновые пакеты, размеры которых определяются интерференцией двух их краев. Таким образом, все промежуточные размеры, отличные от тех, в которых два края волнового пакета усиливают друг друга, а не интерferируют, отвергаются.

Итак, волновая механика сразу зачеркивает возражения против статической модели химиков как якобы динамически невозможной, никоим образом не изменяя полученных вначале линейных соотношений электронных систем.

Принцип неопределенностей

Согласно *принципу неопределенностей Гейзенберга*, квант — это, как всегда, произведение двух факторов, например импульса и длины, или кинетической энергии и времени; но, постулируя, что в математическую формулировку квантовой теории должны входить измеренные или могущие быть непосредственно измеренными величины, Гейзенберг и другие развили мощный практический метод, широко известный как волновая механика, которая позволяет решать многие из проблем, встающих перед теорией. Но здесь нас больше занимает предложенная Гейзенбергом в 1927 г. интерпретация двух факторов, входящих в квант, как сопряженных неопределенностей физического измерения в том смысле, что, чем точнее определяется один из них, тем большая погрешность вносится в другой, так что произведение двух погрешностей или неопределенностей равно планковской константе действия h .

В тех пределах, до которых простираются накопленные знания, это, казалось бы, повсеместно подтверждается в мире атомов и электронов. Наилучшую иллюстрацию к принципу неопределенности дает, вероятно, микроскопия. Всякий микроскопист-практик знает, что единственным способом повысить разрешающую способность объектива микроскопа (т. е. уменьшить расстояние между двумя микроскопическими объектами, при котором еще можно видеть их как два, а не как один объект) является использование для подсветки света с более высокой частотой и меньшей длиной волны. Но в результате отражения света освещаемой частицей последняя испытывает отдачу и меняет свое положение; действительно, свет, как экспериментально установил в начале века П. Н. Лебедев, оказывает давление. Эта отдача тем больше, чем выше частота света, так что попытки улучшить разрешающую способность при помощи более высокочастотной подсветки приводят к большей, чем прежде, неопределенности в положении освещаемой частицы, препятствуя, таким образом, достижению поставленной цели. На этом пути должен существовать, если он уже не дос-

тигнут, некий предел видимости, который дается истинной величиной, т. е. постоянным произведением двух сопряженных погрешностей измерения.

Нулевая энергия

Но Ф. А. Линдеман (лорд Черуэлл), идя еще дальше, попытался показать*, что если с самого начала постулировать: 1) что пространство и время не непрерывны; 2) что неспособность измерить один из сомножителей действия не обусловлена несовершенством современного искусства физического измерения и 3) что концепция непрерывности пространственно-временных явлений, которая навязана нам макроскопическим миром, противопоказана природе, нельзя даже думать о двух самостоятельных точных сомножителях действия (а только об их произведении), то квантовая теория в целом и все ее следствия получаются естественным образом без каких бы то ни было дополнительных допущений. Хотя эти предположения выглядят в согласии с выражением «задним умом крепок», в одном отношении они ведут к некоторому очень важному следствию, которое в конечном счете можно проверить на опыте. Это следствие состоит в том, что при температуре, равной абсолютному нулю, молекулы, даже если это единичные атомы невалентного элемента, не остаются в покое, а обладают некоторой конечной энергией движения. Эта постулируемая энергия, обусловленная относительным движением элементарных частиц материи при абсолютном нуле, называется *нулевой энергией*. Для внутренней колебательной энергии молекул, состоящих более чем из одного атома, существование нулевой энергии можно считать экспериментально доказанным, как это вытекает из объяснения квантовой теорией разделения легких изотопов, о чем уже говорилось в главе седьмой, а также при изложении данных о тяжелом водороде. Но, согласно метафизике лорда Черуэлла, то же самое должно относиться к движению единичных атомов, так что метафизически состояние покоя отныне непредставимо. Математика не может здесь служить аргументацией. Исходя же из физики прийти к окончательному заключению было нельзя, и вставал вопрос, так ли это в действительности или нет.

Невероятен ли покой?

Рассказать о дискуссии, представив ее в намеренно обнаженном и бескомпромиссном виде, не пытаясь нисколько ее приукрасить, интересно уже только потому, что она отмечена многими

* The Physical Significance of the Quantum Theory. Oxford University Press, 1932.

важными для нас веками, не считая чуда, совершенного Эйнштейном, когда он силой своей интуиции извлек из формулы кинетической энергии, преобразованной так, чтобы была инвариантной скорость света, математическую константу, ставшую 30 лет спустя краеугольным камнем энергетики ядерных превращений. Действие — это произведение двух физических величин, которые в целях приведенной аргументации будут импульсом n и длиной. Затем Планк постулирует атом действия h , после чего оно может равняться только $h, 2h, 3h...$ и т. д. по мере возрастания масштабов, но по самой своей природе не может быть нулем, ибо, как уже было показано, нулевое действие означает бесконечные кинетическую энергию и импульс.

Затем, по Гейзенбергу, h — это постоянное произведение двух неопределенностей, одна из которых — импульс, а другая — длина, т. е. координаты положения движущейся частицы по отношению к некоторой отправной точке. Тогда можно написать

$$\Delta P \times \Delta M = h,$$

где ΔP и ΔM — конечные (в противоположность бесконечно малым) возможные интервалы изменения положения и импульса соответственно. В математике это называется гиперболическим соотношением, так же как и закон Бойля, который гласит, что давление, умноженное на объем газа (при постоянной температуре), есть константа.

Точно так же как должно быть бесконечным давление газа, если приравнять нулю объем, и бесконечным объем, если нулю равно давление, неопределенность импульса должна быть бесконечной, если интервал положения равен нулю, т. е. если положение можно определить точно, и наоборот. Придать ясный смысл отдельно положению или импульсу в той же степени невозможно, как отдельно давлению и объему газа. Какое бы определение вы ни дали одной из величин, оно будет обязательно включать другую. Гейзенберг был озабочен освобождением математических формул от всех недоступных наблюдению величин, что привело к удовлетворительным математическим методам описания квантовых систем, не связанным с физическими понятиями и даже просто невразумительно звучащим на языке физики. Тем не менее мы держимся за математику, так как она дает возможность точно и информативно описать совокупность связанных опытных данных, вывести все известные результаты и предсказать новые.

А теперь начинается метафизика. Сопряженные неопределенности обусловлены не просто несовершенством современных измерительных методов, а ложностью пространственно-временных представлений, возникших у нас на базе макроскопических событий и не применимых к атомам и субмикроскопическому миру природы. Поэтому, чтобы объяснить новые факты, следует отка-

заться от наших естественных представлений о пространстве и времени как о независимых и разных непрерывных переменных и в соответствии с этим принципом неопределенности или индетерминизма рассматривать их как сопряженные. Теперь, если считать, что частица находится в определенном пространственном интервале ΔP , то это утверждение будет иметь смысл только в том случае, если действительно можно измерить положение частицы с такой точностью. Но, если положение ее определено таким образом, ей неминуемо сообщается и некоторая неопределенность импульса ΔM . Акт измерения положения с указанной степенью точности сообщает частице именно такой импульс. Следовательно, утверждение, что частица занимает некоторую определенную область пространства, подразумевает также и определенный интервал скоростей частицы в этой области.

Нам достаточно рассмотреть только единичную молекулу или единственный атом химически инертного элемента. Мы говорим, что она существует, но если мы говорим еще и где она существует, то она должна двигаться тем быстрее, чем локальнее определено ее положение. Если поместить несколько таких атомов в кубический ящик или ячейку со стороной l , причем их количество достаточно мало, чтобы не учитывать их столкновений друг с другом, то в среднем каждой молекуле будет приписан импульс h/l , в том числе и при температуре, равной абсолютному нулю, и, следовательно, они будут обладать соответствующим количеством нулевой энергии. Странно в этом методе то, что размеры куба не влияют на расчет нулевой энергии, которая имеет фиксированное значение.

Настало время показать, насколько далеко мы ушли от первоначального убеждения, что квантовая теория никак неприменима к равномерному поступательному движению, а применима только к движению по замкнутой траектории. В этом смысле так называемая *новая квантовая механика Гейзенберга* совсем не связана больше с действием, так как оно является динамической характеристикой, обязательно подразумевающей движение с определенными ограничениями. До тех пор пока оно используется для описания динамики атомов и тому подобных объектов, движущаяся частица должна периодически возвращаться к своему прежнему состоянию движения как в отношении скорости, так и в отношении направления; техническим средством выражения этого является вектор действия. Квантовая механика в результате своего обобщения включает теперь и свободное поступательное движение, для которого действие, обязательно делаясь бесконечным, совершенно теряет какой-либо практический смысл, а пространство и время должны быть сопряжены таким образом, чтобы состояние покоя стало немислимым. Является ли это еще одним запутывающим следствием нововведения Эйнштейна, применившего термин, который Планк использовал для действия, к энергии и ввергшего таким образом физическую сторону дела в неразбериху (точно так

же как ранее простое математическое понятие ускорения внесло сумятицу в классическую динамику в субмикроскопическом мире), или в конце концов это подтвердится само по себе, подобно эквивалентности массы и энергии, еще одной фундаментальной физической истиной сомнительного логического происхождения, — покажет время. Во всяком случае, это кровно затрагивает самолюбие физической науки, которую пока что можно определить как исключение из выводов, сделанных на основе наблюдения, ошибок наблюдателя.

Глава девятая. НА ПУТИ К ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ПЕРВОГО ИСКУССТВЕННОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Методы регистрации единичного распада

В 30-х годах нашего века были значительно усовершенствованы методы обнаружения и измерения α и β -частиц и других подобных излучаемых частиц, которые, благодаря развитию электротехники высокого напряжения, вскоре стало возможно получать искусственным путем. Таким образом, начиная с этого времени, прогресс в развитии рассматриваемого нами предмета чаще всего достигался не с помощью прежних грубых методов, а путем исследования отдельных атомов и их поведения, поскольку данный метод позволяет получить намного более точные результаты, чем любой из использовавшихся ранее в естественных науках. В первую очередь это стало возможно благодаря тому, что вновь открытые частицы обладали очень большой кинетической энергией. Однако при оценке и сравнении последних и более ранних достижений необходимо также помнить о той огромной разнице, которая существует между самыми точными методами, известными вчера, и теми, что применяются в наше время.

На раннем этапе, основываясь на показаниях простого спинтарископа Вильяма Крукса, ученые считали, что отдельную α -частицу можно увидеть невооруженным глазом. Дело в том, что в этом небольшом приборе (рис. 51 и 52) с помощью простых линз можно наблюдать фосфоресцентное свечение экрана из ZnS (он бомбардируется α -частицами, испускаемыми мельчайшей крупинкой радия) в виде мерцающих звездочек, каждая из которых образуется в результате столкновения с экраном отдельной α -частицы. Смотровая линза C (см. рис. 52) сфокусирована на экран B, который бомбардируется излучением радия, находящегося в ничтожном количестве на острие иглы A; расстояние между иглой и экраном можно изменять с помощью винта D. В темноте, прицик-

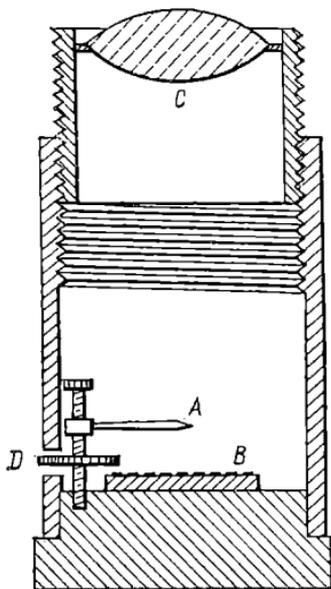


Рис. 51, 52. Спintарскоп Уильяма Крукса

нув глазом к прибору, можно увидеть свечение экрана, преобразованное линзой *C* в скопище мерцающих звездочек.

Таким был впервые использованный Регенером один из ранних методов подсчета α -частиц; этот метод широко применялся в большинстве исследований рассматриваемого нами периода. Однако в наши дни используются менее утомительные и более объективные методы, которые можно разделить на две категории.

В 1899 г., т. е. в самом начале развития теории ионизации газов α -излучением, один из представителей блестящей плеяды исследователей Кавендишской лаборатории в Кембридже Ч. Т. Р. Вильсон занимался изучением того, какую роль играют для метеорологии ионы воздуха, действующие как центры конденсации капель воды в перенасыщенной влагой атмосфере, в результате которой появлялся дождь или туман. В процессе своих исследований он создал замечательный прибор, известный как *камера Вильсона*, позволяющий визуально проследить путь отдельных излучаемых частиц в окружающем их тумане. С течением времени, и особенно после появления стереоскопической фотографии и кино, камера Вильсона превратилась в наиболее ценный инструмент исследования, позволяющий даже проследить динамику столкнове-

ния излучаемых частиц с попадающими на их пути атомными ядрами и в результате вычислить их массу и энергию. Так, в наиболее сложных установках часто наблюдалось явление, когда при прохождении луча сквозь камеру Вильсона фотопленка фиксировала следы излучения, и это в значительной мере способствовало формированию современных представлений о космическом излучении.

На рис. 53 схематически изображен принцип действия камеры Вильсона. Цилиндр с подвижным поршнем P закрыт стеклом W . Поверхность цилиндра покрыта промокательной бумагой, смоченной черной тушью; внутренние стенки цилиндра также выкрашены в черный цвет. Лучи, испускаемые радиоактивным препаратом, попадают в цилиндр из трубки в боковой стенке и проходят сквозь воздух в направлении L . С помощью механического приспособления поршень резко опускается, давая возможность влажному воздуху расшириться и вызывая его конденсацию. Если воздух к тому же ионизован, то капли воды конденсируются вокруг ионов, выявляя таким образом следы ионизирующего излучения. Но сначала в процессе нескольких предварительных расширений воздуха удаляются частицы грязи. В момент резкого расширения воздуха батарея высокого напряжения, создающая в цилиндре электрическое поле (см. рис. 53), отключается и включается вновь лишь при подъеме поршня; это делается для того, чтобы очистить камеру от ионов, образовавшихся при предыдущем расширении. На рис. 54 и 55 изображена усовершенствованная модель камеры Вильсона, выполненная Кембриджской приборостроительной компанией, а на рис. 56 и 57 — следы α -частиц, полученные с помощью этого прибора. Следы α -частиц, благодаря производимой ими интенсивной ионизации, представляют собой широкие прямые линии; резкие отклонения в ряде случаев объясняются ядерными столкновениями.

Следы от β -частиц имеют вид слабых извилистых линий, образованных отдельными каплями воды. Дело в том, что эти частицы вызывают гораздо меньшую ионизацию, а сами они легко отклоняются при столкновении с электронами внешних оболочек атомов. Наблюдая за одним из следов α -частицы в центре рис. 57, можно заметить, что она претерпела одно за другим два ядерных столкновения; на оригинале фотографии видны также слабые извилистые следы, оставленные β -частицами.

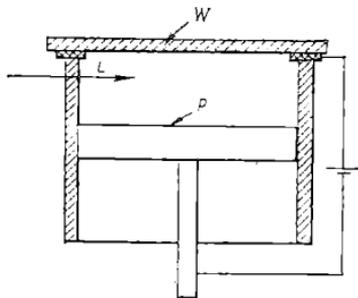


Рис. 53. Принцип действия камеры Вильсона

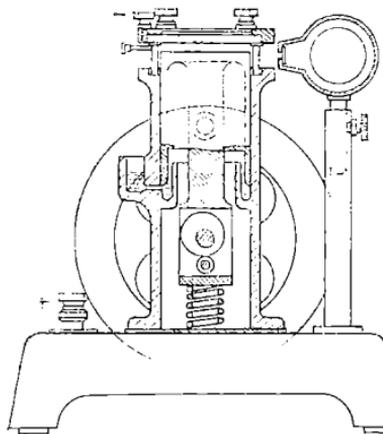
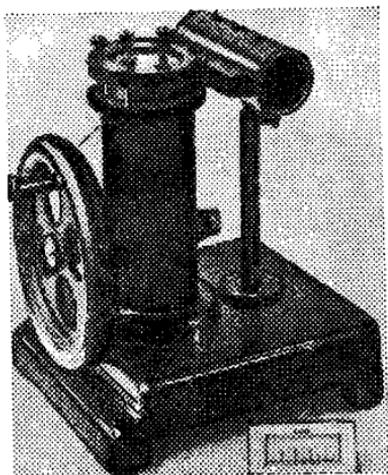


Рис. 54, 55. Камера Вильсона, изготовленная Кембриджской приборостроительной компанией

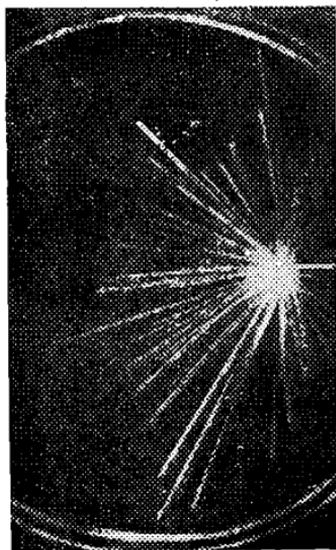


Рис. 56. Следы α -частиц радия в камере Вильсона

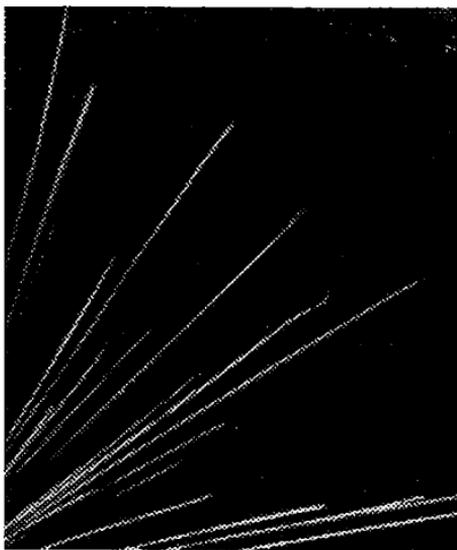


Рис. 57. Увеличенное изображение следов α -частиц

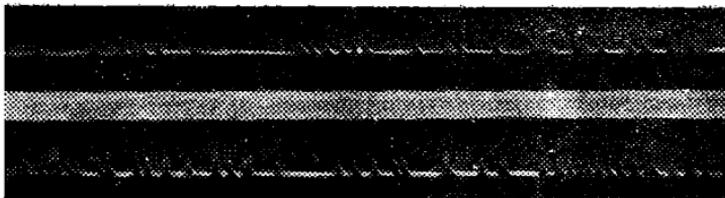


Рис. 58. Фотозапись α -частиц, сделанная с помощью счетчика Резерфорда — Гейгера и проволочного электрометра

Методы усиления

Другой метод основывается на усилении процесса ионизации, в первую очередь путем столкновения ионов с нейтральными молекулами газа в электрическом поле, напряженности которого недостаточно для того, чтобы вызвать искру. К разработке этого метода первым приступил Джон Таунсенд, также один из членов уже упоминавшейся группы по изучению ионизации газов в Кавендишской лаборатории в Кембридже. Находящийся в газовой среде положительно заряженный ион имеет большую массу, чем отрицательно заряженный ион, однако уступает ему в подвижности. Исходя из этого, метод усиления основан на том, что отрицательный ион первым набирает скорость, необходимую для ионизации молекул путем их столкновения. В таких условиях ионизация, хотя и увеличивается в значительной степени, все же имеет предел. Но когда положительные ионы также приобретают скорость, придающую им ионизирующую способность, ионизация становится неограниченной и таким образом создаются условия для электрического разряда в газе. Сперва, с помощью проволочного электрометра и фотографического записывающего устройства, удалось установить скорость ионизации вплоть до 1000 частиц в минуту. На рис. 58 изображена фотозапись α -частиц, сделанная с помощью счетчика Резерфорда — Гейгера и проволочного электрометра; верхняя фотограмма соответствует прохождению через счетчик 600 частиц в минуту. В современном виде этот принцип применяется в так называемых *счетчиках Гейгера*, показания которых зависят от электрического разряда на острие иглы. Счетчик Гейгера является одним из самых простых и в то же время исключительно полезных приборов; он в равной степени реагирует как на α -частицы, так и на β -частицы. На рис. 59 изображена запись этим счетчиком α - и β -частиц (на верхней фотограмме зарегистрированы β -частицы, а на нижней — α -частицы).

Знаменательно, однако, что в наши дни для обнаружения и измерения количества частиц ученые стали использовать термо-

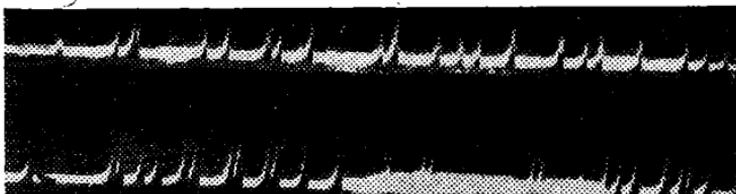


Рис. 59. Запись α - и β -частиц счетчиком Гейгера

электронную лампу, которая еще в 20-х годах сделала возможным появление радиоприемников. При этом получаются такие результаты, которые четверть века назад показались бы невероятными. Оказывается, одна-единственная частица может привести в действие электрический звонок или проявить себя каким-либо иным образом. Скажем, с помощью электронно-счетного прибора (тиратрона) частицы могут управлять механическим счетным устройством; они могут также приводить в действие и другие приборы, если их сигналы достаточно усилить.

Приведем такой пример. Испытуемый, в тело которого введена ничтожная доза радиоактивного вещества, протягивает руку к счетчику Гейгера. По имеющимся данным, в случае если радиоактивность была введена через пищевой тракт, она будет зафиксирована счетчиком через 20 минут, а если путем подкожного впрыскивания — то всего через 20 секунд. Этот пример хорошо показывает, какого высочайшего уровня точности измерения мы сейчас достигли.

В исследованиях радиоактивности, как ни в одной другой области знаний, четко прослеживается огромная важность для науки бесконечно малых величин: раньше история не знала таких случаев, чтобы столь многое зависело от столь малого; применительно к сегодняшнему миру можно сказать что от бесконечно малого зависит даже слишком многое.

Атомное ядро и астрономия

Изучив самым детальным образом способность α -частиц проходить сквозь различные вещества, Резерфорд сделал вывод, что столкновение α -частиц с ядрами элементов, атомная масса которых превышает атомную массу меди (63), носит упругий характер и протекает согласно обычному закону электростатического отталкивания. В результате своих опытов он определил, что диаметр ядра атома порядка 0,0001 диаметра атома водорода. Поскольку практически вся масса атома заключена в его ядре, следователь-

но, плотность ядра примерно в один миллиард раз превышает плотность воды или же в 50 миллионов раз больше плотности самого плотного из всех известных веществ.

В дальнейшем астрономам удалось обнаружить свидетельство того, что плотность некоторых звезд, в частности *белых карликов*, действительно такого порядка. Они даже считают, что периодический коллапс звезд в результате потери энергии на излучение, который сопровождается интенсивным выделением энергии, — это нормальное явление для эволюции звезд. Угасая, звезда превращается в «голые» атомы, внешняя электронная оболочка которых разрушена; вещество приобретает вид сверхплотно сжатого комка, состоящего из ядер этих атомов, который окружен свободными электронами. Ученые теоретически обосновали различные стадии эволюции звезд, каждая из которых соответствует последовательной потере атомами электронных орбит, начиная с внешней и кончая самой близкой к ядру. И тут было высокопарно объявлено, что сами небеса свидетельствуют в пользу атома Резерфорда!

Испускаемые протоны

И все же для нашего рассказа гораздо более «земное» значение имеют результаты изучения более легких элементов. Дело в том, что дезинтегрирующее влияние α -частиц было впервые установлено именно применительно к легким элементам с нечетными атомными номерами. Несколько в стороне от этого общего правила находится водород, динамика столкновений которого уникальна, поскольку это единственный из всех элементов с ядром, уступающим α -частице. Исходя из этого, ученые ожидали, что при лобовом столкновении с α -частицей ядро водорода продвигается вперед со скоростью, значительно превышающей скорость частицы, сообщившей ему движение, а пройденное им расстояние в четыре раза превышает расстояние, проходимое α -частицей. Эти выпускаемые Н-частицы являются свободными ядрами водорода, или протонами, как ошибочно был назван однозарядный положительно заряженный ион водорода.

Первым свободные ядра водорода наблюдал в 1914 г. Марден; впоследствии было установлено, что предсказания относительно длины преодолеваемого ими пути соответствовали действительности. Дело в том, что протоны проходят значительное расстояние, что облегчает наблюдение за ними. И хотя в сернистом цинке они вызывают всего лишь слабое мерцание, их можно изучать на расстоянии, значительно превышающем расстояние, на которое может проникать даже самое мощное α -излучение, аналогично тому как для изучения относительно слабых γ -квантов их достаточно пропустить сквозь экран, способный задержать все другие виды

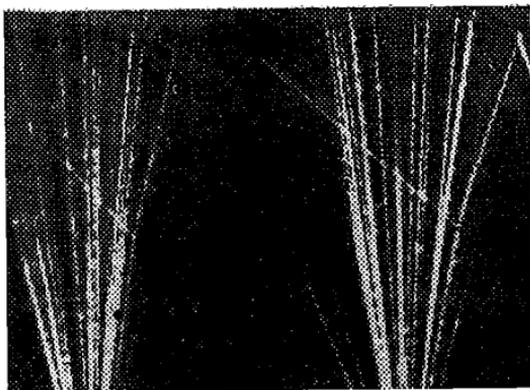


Рис. 60. Упругое столкновение α -частицы с ядром водорода

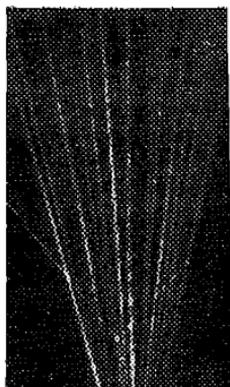


Рис. 61. Упругое столкновение α -частицы с ядром гелия

излучения. На рис. 60 и 61 приведены сделанные профессором Блэкеттом фотографии, изображающие упругое столкновение α -частицы с ядрами водорода и гелия. Первый из снимков является примером более современной «стереографической» двухплоскостной фотографии столкновения, из которой можно вывести его трехмерную диаграмму.

Расщепление ядер легких элементов альфа-частицами

Несколько позднее, а именно в 1919—1922 гг., Резерфорд обнаружил, что при прохождении α -частиц через газообразный азот образуется некоторое количество испускаемых протонов, преодолевающих расстояние на $1/3$ больше, чем путь, проходимый протонами водорода, хотя по всем другим характеристикам протоны водорода и азота совершенно подобны. Другие легкие элементы с нечетными атомными номерами (вплоть до фосфора) также генерируют протоны, хотя и в значительно меньшем количестве. Однако радиус действия протонов алюминия в три раза превышает радиус действия протонов водорода, что соответствует кинетической энергии большей, чем кинетическая энергия генерирующих их α -частиц; помимо этого, значительная часть протонов испускается в противо-

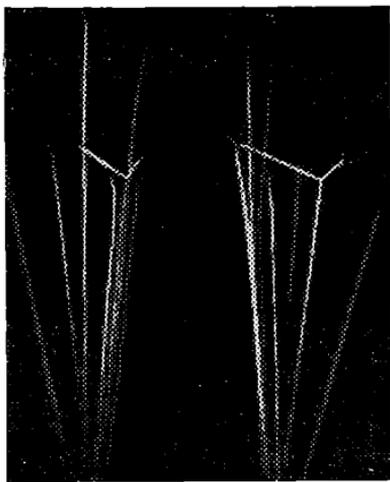


Рис. 62. Упругое столкновение α -частицы с ядром кислорода



Рис. 63. Неупругое столкновение α -частицы с атомом азота, при котором ядро азота расщепляется

положном направлении. Подобные факты со всей очевидностью свидетельствуют о том, что протоны действительно образуются в результате расщепления ядер бомбардируемых элементов.

Примерно только один из миллиарда атомов водорода, в которые вторгаются α -частицы, становится испускаемым протоном, а 100 000 α -частиц могут образовать всего несколько протонов; при воздействии одного миллиона α -частиц азот дает около 20, а алюминий — 8 протонов. Так называемые *вильсоновские следы* в азоте были впервые зафиксированы на киноплёнке американским ученым Харкинсом, а затем — англичанином Блэккетом. Последний тщательно изучил 23 000 фотографий, на каждой из которых находилось примерно по 20 следов α -частиц, но только в 8 случаях зарегистрировал выталкивание легкого протона. На рис. 62 и 63 можно сравнить упругое столкновение α -частицы с ядром кислорода (где короткая линия, уходящая вправо, показывает путь атома кислорода после столкновения — см. рис. 62) и неупругое столкновение α -частицы с атомом азота (см. рис. 63), которое, как уже говорилось, происходит чрезвычайно редко и в результате которого атом азота распадается. При этом образуется выбитое из атома азота ядро водорода, оставляющее слабый прямой след, а также составное ядро, которое, отлетая в сторону, оставляет за собой

жирный кривой след (движение по кривой линии объясняется последующими ядерными столкновениями).

Этот опыт позволил сделать важное открытие: при всех проводившихся экспериментах после подобного столкновения α -частица не оставляла никакого следа. Уже намного позднее, когда было изучено огромное количество аналогичных случаев и когда было установлено, что этот вид расщепления является одним из самых распространенных, — только тогда ученые смогли с уверенностью сказать, что ядро гелия соединялось с ядром азота, выталкивая при этом протон и образуя ядро изотопа кислорода с массой 17, в то время еще неизвестного и открытого только спустя несколько лет. Что же касается основного вывода из данного опыта, а именно, что при ядерном столкновении выталкивается протон, то в этом практически никогда не сомневались.

Обычно принято связывать результаты приведенных выше опытов, широко известных как *расщепление атома*, с первым осуществлением искусственной трансмутации; однако, если быть точным, их следует рассматривать как первый случай использования естественной трансмутации одних элементов для осуществления трансмутации других. Как бы то ни было, достижение полностью искусственной трансмутации на уровне отдельных атомов теперь было уже не за горами.

Наличие точных сведений о природе α - и β -частиц все больше подводило ученых к признанию того, что это ионы, которые можно ускорить искусственным путем при помощи электрического поля с достаточно высоким, но в то же время легко измеримым потенциалом. Вполне естественно, что признание этого факта в огромной мере стимулировало поиски средств для обеспечения более высокого напряжения, чем было доступно в то время. Большие индукционные катушки, использовавшиеся для генерирования рентгеновского излучения, как правило, не достигали потенциала 100 000 в, в то время как более быстрые α -частицы обладают энергией, которую можно высвободить искусственным путем только при наличии потенциала в 4 млн. в.

Электронвольт

В наши дни большую практическую пользу для измерения энергии отдельных атомов и ионов имеет такая единица, как *электронвольт (эв)*, равная $1,59 \cdot 10^{-12}$ эрг. Тепловая энергия молекулы газа при комнатной температуре составляет около 0,04 эв, а химическая энергия синтеза воды из водорода и кислорода равна примерно 3 эв. При измерении химической энергии в данной системе единиц она почти никогда не превышает 4 эв. Это, в частности, выражается в том, что максимально возможное напряжение первичных и вторичных гальванических элементов может быть чуть

больше 2 в. Однако в рассматриваемой нами области радиоактивных излучений мы имеем дело с такой единицей, как миллион электронвольт — мегаэлектронвольт (*Мэв*). Для электрона и протона, несущих атомные заряды в 1 единицу, кинетическая энергия в 1 *Мэв* численно равна напряжению, необходимому для того, чтобы вызвать скорость, которая соответствовала бы вычисленной в этих единицах кинетической энергии. Для двухзарядных α -частиц необходимое напряжение численно соответствует лишь половине энергии, измеренной в мегаэлектронвольтах. Энергия самых быстрых из основной массы α -частиц радия и тория равна примерно 8 *Мэв*, хотя известно несколько интересных с теоретической точки зрения α -частиц «дальнего действия» (например, в тории одна такая частица попадает на 5000 обычных, причем опять-таки длина ее пробега вполтину меньше длины пробега самых быстрых из обычных α -частиц).

Мэв практически соответствует потере атомной массы, равной 0,001 единицы массы, или, если быть до конца точным, 1 единица атомной массы обладает энергией в 931,6 *Мэв*. Таким образом, выталкивание быстрой α -частицы вызывает абсолютную потерю 0,008 атомной массы на энергию выталкивания, если не считать 4 единиц массы, уносимых испускаемой частицей.

Исследования Астона в области изотопов

Вернемся теперь к вопросу об изотопах. Для этого необходимо вспомнить, что в 1913 г. Дж. Дж. Томсон с помощью положительных лучей получил первое, еще недостаточно убедительное свидетельство того, что неон, атомная масса которого равна 20,183, кроме основного изотопа с массовым числом 20 содержит несколько процентов изотопа с массовым числом 22, чем и объясняется тот факт, что общая атомная масса этого элемента не выражается целым числом. Неубедительность свидетельства Томсона заключалась в том, что это массовое число вполне могло объясняться присутствием двухзарядной молекулы двуокиси углерода (CO_2) или каких-либо других примесей, которые, как правило, дают о себе знать в вакуумных трубках. В своих опытах Томсон применял так называемый *метод парабол*, когда отклонение ионов в электрическом и магнитном полях происходит в плоскостях, перпендикулярных друг к другу и направлению движения ионов. При этом ионы с одинаковым отношением m/e оставляют на фотопластинке, благодаря своей большой скорости и кинетической энергии, параболический след.

После первой мировой войны Астон усовершенствовал этот опыт, добившись такого положения, когда оба отклонения происходили в одной и той же плоскости, но в противоположных направлениях (в наши дни этот метод получил повсеместное рас-

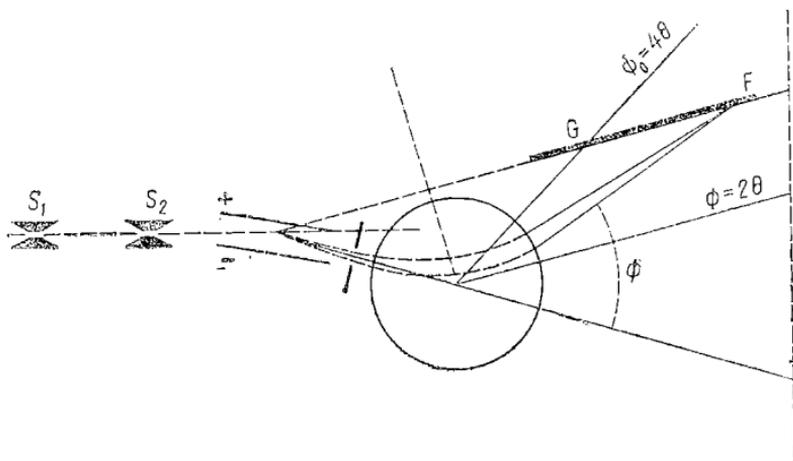


Рис. 64. Принцип действия первого масс-спектрографа Астона

пространстве). В результате ему удалось добиться уникального по своему значению фокусирующего эффекта, до предела повысившего чувствительность и точность этого метода. Получив в руки такой замечательный прибор, ученый тут же обнаружил, что многие из наиболее распространенных элементов представляют собой смесь изотопов. В первую очередь это было установлено для хлора (атомная масса 35,457), который, как оказалось, состоит из двух изотопов с массовыми числами 35 и 37, из соотношения которых и складывается общая атомная масса элемента. В конечном итоге были сделаны два широких обобщения, значение которых невозможно переоценить: во-первых, было установлено, что массовые числа всех отдельно взятых изотопов — приблизительно целые числа (по отношению к кислороду, массовое число которого равно 16); во-вторых, наибольшие отклонения точных значений от целых чисел (в порядке их расположения в периодической системе) представляют собой постоянную функцию атомных масс, о чем подробнее будет сказано ниже.

В 1919 г., работая в Кавендишской лаборатории, Астон создал свой первый масс-спектрограф, позволивший воплотить в жизнь усовершенствованный им метод Томсона по определению массы положительно заряженных ионов. Этот первый прибор был способен измерять массу ионов с погрешностью до 0,001. Вскоре появились намного более точные приборы, сконструированные Астоном, а также компанией «Континентал энд Американ уоркерс». Эти приборы, особенно те из них, которые были построены в Америке,

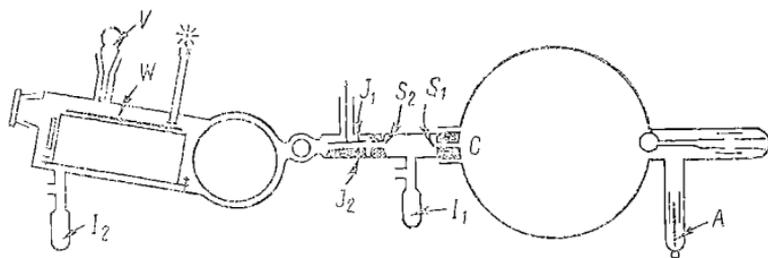


Рис. 65. Схема первого масс-спектрографа Астона

принадлежат к числу наиболее замечательных и точных измерительных приборов, когда-либо созданных человеком.

На рис. 64 показан принцип действия первого масс-спектрографа Астона. Пучок положительно заряженных ионов, направляемый с помощью прорезей S_1 и S_2 , проходит сквозь электростатическое поле, которое образуется между двумя заряженными пластинами и под воздействием которого пучок отклоняется вниз. Затем пучок проходит сквозь магнитное поле, отклоняющее его вверх в той же плоскости, причем весь пучок фокусируется на линии GF , воспроизводя спектр массы (точки G и F соответственно показывают минимальную и максимальную массу). На рис. 65 C — это перфорированный вогнутый катод, а A — анод газоразрядной трубки B . Положительно заряженные лучи, пройдя сквозь прорези S_1 и S_2 , через электрическое поле $I_1 I_2$ и магнитное поле M , доходят до фотопластинки W . Буквами I_1 и I_2 обозначены колбы с древесным углем, охлаждаемые жидким воздухом в целях поддержания вакуума. Приспособление V позволяет изменять положение фотопластинки таким образом, чтобы она подвергалась воздействию вторичного облучения.

На рис. 66 воспроизведена фотография первого масс-спектрографа, установленного Астоном в 1919 г. в Кавендишской лаборатории, а ныне находящегося в Музее истории науки в Саут-Кенсингтоне. В этом приборе индукционная катушка расположена под лабораторным столом; исследуемый газ находится над ртутью в сосудах C , а буквой G обозначен ротационный ртутный насос.

Свой второй масс-спектрограф Астон сконструировал в 1925 г.; погрешность его измерений была 0,0001, что вполне достаточно для того, чтобы различить масс-спектры любого известного элемента. Однако на пути повышения разрешающей способности прибора неожиданно возникли серьезные трудности, которые заключались в отрицательном воздействии эффекта поляризации, существующего в электрическом поле. Астон, а потом и другие ученые стреми-

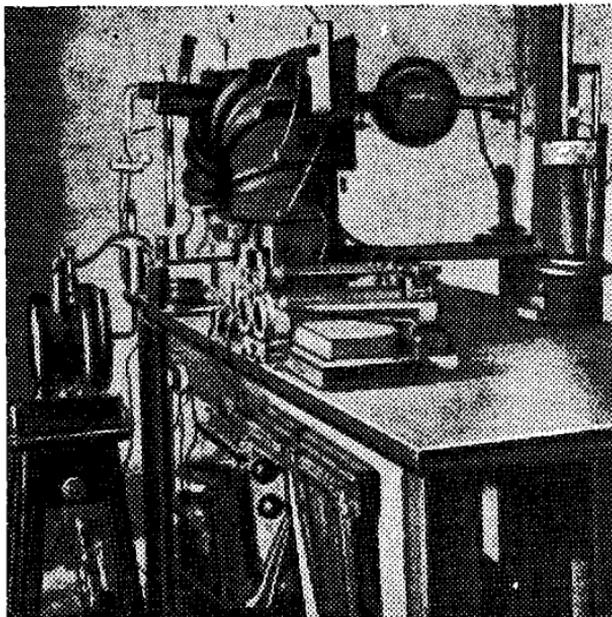


Рис. 66. Первый масс-спектрограф Астона в Кавендишской лаборатории

лись избежать этого эффекта, увеличивая расстояние и напряжение, а также перестраивая всю систему.

В 1937 г. Астон завершил создание своего третьего масс-спектрографа. Вот только несколько примеров, демонстрирующих работу этих приборов. Точность измерения в огромной степени повысилась; в благоприятных случаях погрешность составляла 0,00001, а в среднем она не превышала 0,00003—0,00004.

К этому времени постепенно была усовершенствована практика «естественной группировки», заключающаяся в том, что на одной и той же фотографии фиксировались два различных иона с одинаковым массовым числом, например однозарядный ион кислорода (O^+) и однозарядный ион метана (CH_4^+), имеющие массовое число 16. Таким образом, этот дуплет вскрывал разницу между точными значениями атомной массы водорода и углерода по отношению к эталонной атомной массе кислорода 16. При этом необходимо иметь в виду, что в действительности измеряется не m , а m/e , так что однозарядный ион, обладающий массой m , имеет

такое же массовое число, как и двухзарядный ион с массой $2m$ или трехзарядный ион с массой $3m$. Количество зарядов иона всегда вычисляется, а то и просто угадывается, однако, как думается, это не приводит к серьезным ошибкам. Заслуга Астона состоит в том, что он довольно искусно сумел получить из присутствующих в подобных спектрах ионов углерода серию линий, отличающихся друг от друга по степени единства. Так, первая углеродная группа состоит из однозарядных положительных ионов C^+ , CN^+ , CN_2^+ , CN_3^+ , CN_4^+ , имеющих соответственно массовые числа 12, 13, 14, 15 и 16; вторая углеродная группа, в которой на один ион приходится по два атома углерода, имеет массовые числа от 24 до 30, а третья углеродная группа (с тремя атомами углерода на каждый ион — от C_3^+ до $C_3H_8^+$) имеет массовые числа от 36 до 44. Эти линии послужили хорошей основой для сравнения, поскольку по аналогии с ними можно было сгруппировать и любые другие ионы, имеющие такое же массовое число. На рис. 67 приведено несколько примеров масс-спектров Астона, полученных, за исключением самого верхнего спектра *A*, с помощью масс-спектрографа. Спектр *A* был получен на втором масс-спектрографе и показывает первую углеродную группу, причем массовое число 16 соответствует группе кислорода (O^+) и метана (CN_4^+), которые впервые, таким образом, удалось четко разграничить, хотя их массы различаются лишь на 0,036. Спектр *B* показывает третью углеродную группу с массовым числом от 36 до 44, что вызывается ионами от C_3^+ до $(C_3H_8)^+$. На спектре *C* видна граница между этой группой и двухзарядными ионами изотопов криптона с массовым числом 82, 83, 84 и 86, причем раздвоение на уровне 40 и 44 происходит из-за присутствия соответственно примесей аргона и двуокиси углерода. На диаграмме *D* показано разграничение между этой же группой и трехзарядными ионами изотопов ксенона: изотоп с массовым числом 129 дает дуплет на отметке 43, изотоп 131 — на отметке $43\frac{2}{3}$, 134 — на отметке $44\frac{2}{3}$ и 136 — на отметке $45\frac{1}{3}$.

К 1931 г. было уже изучено 64 элемента и оказалось, что только 22 из них однородны. Остальные же представляют собой смесь изотопов, причем самый сложный из них — олово (атомная масса 118,7, атомный номер 50) — имеет 11 изотопов с массой от 112 до 124.

К 1945 г., используя более точные методы, ученые открыли 283 изотопа, присущих 83 элементам, и только 20 элементов оказались однородными (следует, правда, отметить, что во многих элементах сопутствующие им изотопы содержатся в крайне незначительном количестве). В табл. 2 химические элементы расположены в порядке возрастания их атомного номера и атомной массы, а также показаны особенности их изотопного состава.

Изотопический состав устойчивых элементов (1945)

Атомный номер	Элемент	Атомная масса	Диапазон массовых чисел: (S) — устойчивый; (T) — следы (меньше 0,01%)	Распространенность, % (курсивом) в порядке распространенности
1	H	1,008	1—2	1, <i>99,98</i> ; 2, <i>0,02</i>
2	He	4,003	3—4	4, <i>100</i> ; 3, (T)
3	Li	6,940	6—7	7, <i>92,5</i> ; 6, <i>7,5</i>
4	Be	9,02	9(S)	
5	B	10,82	10—11	11, <i>81,6</i> ; 10, <i>18,4</i> .
6	C	12,010	12—13	12, <i>98,9</i> ; 13, <i>1,1</i>
7	N	14,008	14—15	14, <i>99,62</i> ; 15, <i>0,38</i>
8	O	16,000	16—18	16, <i>99,76</i> ; 18, <i>0,20</i> ; 17, <i>0,04</i>
9	F	19,00	19(S)	
10	Ne	20,183	20—22	20, <i>90,00</i> ; 22, <i>9,73</i> ; 21, <i>0,27</i>
11	Na	22,997	23(S)	
12	Mg	24,32	24—26	24, <i>77,4</i> ; 25, <i>11,5</i> ; 26, <i>11,1</i>
13	Al	26,97	27(S)	
14	Si	28,06	28—30	28, <i>89,6</i> ; 29, <i>6,2</i> ; 30, <i>4,2</i>
15	P	30,98	31(S)	
16	S	32,066	32—36	32, <i>95,1</i> ; 34, <i>4,2</i> ; 33, <i>0,74</i> ; 36, <i>0,016</i>
17	Cl	35,457	35—37	35, <i>75,4</i> ; 37, <i>24,6</i>
18	Ar	39,944	36—40	40, <i>99,63</i> ; 36, <i>0,31</i> 38, <i>0,06</i>
19	K	39,096	39—41	39, <i>93,4</i> ; 41, <i>6,6</i> ; 40, <i>0,01</i>
20	Ca	40,08	40—48	40, <i>96,97</i> ; 44, <i>2,06</i> ; 42, <i>0,64</i> ; 48, <i>0,185</i> ; 43, <i>0,145</i> ; 46 (T)
21	Sc	45,10	45(S)	
22	Ti	47,90	46—50	48, <i>73,45</i> ; 46, <i>7,94</i> ; 47, <i>7,75</i> ; 49, <i>5,52</i> ; 50, <i>5,34</i>
23	V	50,95	51(S)	
24	Cr	52,01	50, 54	52, <i>81,6</i> ; 53, <i>10,4</i> ; 50, <i>4,9</i> ; 54, <i>3,1</i>
25	Mn	54,93	55(S)	
26	Fe	55,85	54—58	56, <i>91,6</i> ; 54, <i>6,0</i> ; 57, <i>2,1</i> ; 58, <i>0,28</i>
27	Co	58,94	57—59	59, <i>99,8</i> ; 57, <i>0,2</i>
28	Ni	58,69	58—64	58, <i>67,4</i> ; 60, <i>26,7</i> ; 62, <i>3,8</i> ; 61, <i>1,2</i> ; 64, <i>0,88</i>

Атомный номер	Элемент	Атомная масса	Диапазон массовых чисел; (S) — единственный; (T) — следы (меньше 0,01%)	Распространенность, % (курсивом) в порядке распространенности
29	Cu	63,54	63—65	63, <i>70,13</i> ; 65, <i>29,87</i>
30	Zn	65,38	64—70	64, <i>50,9</i> ; 66, <i>27,3</i> 68, <i>17,4</i> ; 67, <i>3,9</i> ; 70, <i>0,5</i>
31	Ga	69,72	69—71	69, <i>61,2</i> ; 71, <i>38,8</i>
32	Ge	72,60	70—76	74, <i>37,1</i> ; 72, <i>27,3</i> ; 70, <i>21,2</i> ; 73, <i>7,9</i> ; 76, <i>6,5</i>
33	As	74,91	75(S)	
34	Se	78,96	74—82	80, <i>48,0</i> ; 78, <i>24,0</i> ; 76, <i>9,5</i> ; 82, <i>9,3</i> ; 77, <i>8,3</i> ; 74, <i>0,9</i>
35	Br	79,916	79—81	79, <i>50,6</i> ; 81, <i>49,4</i>
36	Kr	83,7	78—86	84, <i>57,11</i> ; 86, <i>17,47</i> ; 82, <i>11,53</i> ; 83, <i>11,53</i> ; 80, <i>2,01</i> ; 78, <i>0,38</i>
37	Rb	85,48	85—87	85, <i>72,8</i> ; 87, <i>27,2</i>
38	Sr	87,63	84—88	88, <i>82,56</i> ; 86, <i>9,86</i> 87, <i>7,02</i> ; 84, <i>0,56</i>
39	Y	88,92	89(S)	
40	Zr	91,22	90—96	90, <i>48,0</i> ; 92, <i>22,0</i> ; 94, <i>17,0</i> ; 91, <i>11,5</i> ; 96, <i>1,5</i>
41	Nb	92,91	93(S)	
42	Mo	95,95	92—100	98, <i>24,1</i> ; 96, <i>16,6</i> ; 95, <i>16,1</i> ; 92, <i>14,9</i> ; 97, <i>9,65</i> ; 94, <i>9,40</i> ; 100, <i>9,25</i>
43	(Ms)			
44	Ru	101,7	96—104	102, <i>31,34</i> ; 104, <i>18,27</i> ; 101, <i>16,98</i> ; 99, <i>12,81</i> ; 100, <i>12,70</i> ; 96, <i>5,68</i> ; 98, <i>2,22</i>
45	Rh	102,91	103(S)	
46	Pd	106,7	102—110	106, <i>27,2</i> ; 108, <i>26,8</i> ; 105, <i>22,6</i> ; 110, <i>13,5</i> ; 104, <i>9,3</i> ; 102, <i>0,8</i>
47	Ag	107,88	107—109	107, <i>51,9</i> ; 109, <i>48,1</i>
48	Cd	112,41	106—116	114, <i>28,0</i> ; 112, <i>24,2</i> ; 111, <i>13,0</i> ; 110, <i>12,8</i> 113, <i>12,3</i> ; 116, <i>7,3</i> ; 106, <i>1,4</i> ; 108, <i>1,0</i>

Атомный номер	Элемент	Атомная масса	Диапазон массовых чисел; (S)—единственный; (T)—следы (меньше 0,01%)	Распространенность, % (курсивом) в порядке распространности
49	In	114,76	113—115	115, <i>95,5</i> ; 113, <i>4,5</i>
50	Sn	118,70	112—124	120, <i>28,5</i> ; 118, <i>22,5</i> 116, <i>15,5</i> ; 119, <i>9,8</i> 117, <i>9,1</i> ; 124, <i>6,8</i> 12, <i>5,5</i> ; 112, <i>1,1</i> ; 114, <i>0,8</i> ; 115, <i>0,4</i>
51	Sb	121,76	121—123	121, <i>56,0</i> ; 123, <i>44,0</i>
52	Te	127,61	120—130	130, <i>33,1</i> ; 128, <i>32,8</i> ; 126, <i>19,0</i> ; 125, <i>6,0</i> ; 124, <i>4,5</i> ; 122, <i>2,9</i> ; 123, <i>1,6</i> ; 120 (T)
53	I	126,92	127(S)	
54	Xe	131,3	124—136	132, <i>26,96</i> ; 129, <i>26,23</i> ; 131, <i>21,17</i> ; 135, <i>10,54</i> ; 136, <i>8,95</i> ; 130, <i>4,07</i> ; 128, <i>1,90</i> ; 124, <i>0,094</i> ; 126, <i>0,088</i>
55	Cs	132,91	133(S)	
56	Ba	137,36	130—138	138, <i>71,7</i> ; 137, <i>11,3</i> ; 136, <i>7,8</i> ; 135, <i>6,6</i> ; 134, <i>2,42</i> ; 130, <i>0,101</i> ; 132, <i>0,097</i>
57	La	138,92	139(S)	
58	Ce	140,13	136—142	140, <i>89,0</i> ; 142, <i>11,0</i> ; 138 (T); 136 (T)
59	Pr	140,92	141(S)	
60	Nd	144,27	142—150	142, <i>25,95</i> ; 144, <i>22,6</i> 146, <i>16,5</i> ; 143, <i>13,0</i> ; 145, <i>9,2</i> ; 148, <i>6,8</i> ; 150, <i>5,95</i>
61	—			
62	Sm	150,43	144—154	152, <i>26,0</i> ; 154, <i>20,0</i> ; 147, <i>17,0</i> ; 149, <i>15,0</i> ; 148, <i>14,0</i> ; 150, <i>5,0</i> ; 144, <i>3,0</i>
63	Eu	152,0	151—153	153, <i>50,9</i> ; 151, <i>49,1</i>
64	Gd	156,9	152—160	158, <i>23,45</i> ; 160, <i>20,87</i> ; 106, <i>20,59</i> ; 157, <i>16,42</i> ; 155, <i>15,61</i> ; 154, <i>2,86</i> ; 152, <i>0,20</i>
65	Tb	159,2	159(S)	
66	Dy	162,46	158—164	164, <i>28,0</i> ; 163, <i>24,0</i> ; 162, <i>24,0</i> ; 161, <i>22,0</i> ; 160, <i>1,5</i> ; 158, <i>0,1</i>

Атомный номер	Элемент	Атомная масса	Диапазон массовых чисел; (S) — единственный; (T) — следы (меньше 0,01%)	Распространенность, % (крупным в порядке распространенности)
67	Ho	164,94	165(S)	166, 32,9; 168, 26,9; 167, 24,4;
68	Er	167,2	162—170	170, 14,2; 164, 1,5; 162, 0,1
69	Tm	169,4	169(S)	174, 29,58; 172, 21,49; 173, 17,02;
70	Yb	173,04	168—176	171, 14,26; 176, 13,38; 170, 4,21;
71	Lu	174,99	175—176	168, 0,06.
72	Hf	178,6	174—180	175, 97,5; 176, 2,5
73	Ta	180,88	181(S)	180, 35,14; 178, 27,13; 177, 18,47;
74	W	183,92	180—186	179, 13,85; 176, 5,3; 174, 0,18
75	Re	186,31	185—187	184, 30,1; 186, 29,8; 182, 22,6;
76	Os	190,2	184—192	183, 17,3; 180, 0,2
77	Ir	193,1	191—193	187, 61,8; 185, 38,9
78	Pt	195,23	192—198	192, 41,0; 190, 26,4; 189, 16,1;
79	Au	197,2	197(S)	188, 13,3; 187, 1,64; 186, 1,58;
80	Hg	200,61	196—204	184, 0,018
81	Tl	204,39	203—205	193, 61,5; 191, 38,5
82	Pb	207,21	204—208	195, 35,3; 194, 30,2; 196, 26,6;
83	Bi	209,00	209(S)	198, 7,2; 192, 0,8
84	Po	210		202, 29,56; 200, 23,26; 199, 17,03;
85	Rn	222		201, 13,17; 198, 10,11; 204, 6,72;
86	Rp			196, 0,15.
87				205, 70,9; 203, 29,1
88	Ra	226,05		208, 52,3; 206, 23,6; 207, 22,6;
				204, 1,5

Атомный номер	Элемент	Атомная масс	Диапазон массовых чисел; (S) — единичный; (T) — следы (меньше 0,01%)	Распространенность, % (курсивом) в порядке распространенности
89	Ac	227		
90	Th	232, 12	232(S)	
91	Pa	231		
92	U	238, 07	234—238	238, <i>99,28</i> ; 235, <i>0,71</i> ; 234 (T).

Мы несколько не погрешим против истины, если сформулируем уже высказанную нами мысль следующим образом: сложность науки об атомной энергии в наши дни в основном объясняется существованием в природе огромного количества атомов, отличающихся друг от друга. Ведь в табл. 2 показаны только стабильные виды, способные к самостоятельному существованию в качестве обособленных химических элементов. Однако помимо них существует примерно такое же количество нестабильных атомов, выходя-

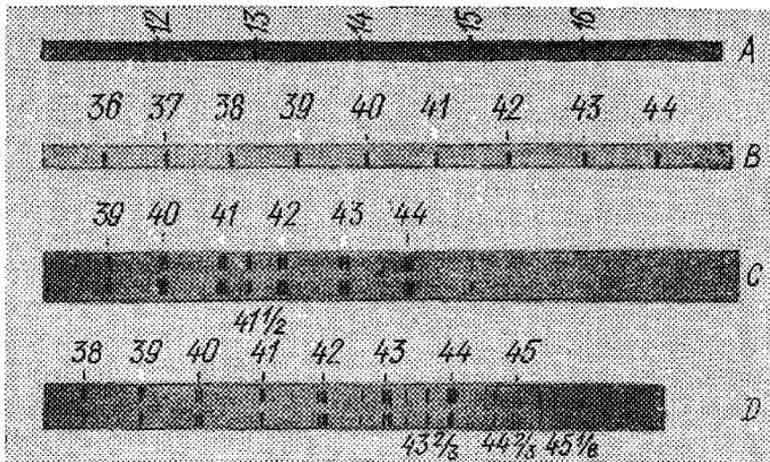


Рис. 67. Образцы масс-спектров, полученных Астоном

щих за пределы массовых чисел, приведенных в табл. 2, причем по мере расширения исследований их число увеличивается.

Четные и нечетные элементы

При определении изотопного состава элементов, приведенных в табл. 2, больше всего поражает огромная разница между элементами с нечетным и четным атомным номером. За исключением одного-единственного спорного случая, каким является торий (атомный номер 90), все 43 четных элемента — сложные, и, взятые вместе, они имеют 223 изотопа (в среднем по 5 изотопов на каждый элемент). В то же время из 40 нечетных элементов 20 однородны, а остальные представляют собой пары, массы которых выражаются следующими друг за другом нечетными числами. Так, нечетный элемент хлор (атомная масса 35,46; атомный номер 17), на котором и было сделано данное наблюдение впервые, имеет два изотопа с массами 35 и 37. В равной степени это относится и ко всем неоднородным элементам, хотя для нескольких легких элементов массы выражаются следующими друг за другом числами.

До сих пор никто из ученых не мог дать убедительного теоретического объяснения данному явлению. А между тем вполне очевидно, что оно имело бы первостепенное значение для решения такой малоизученной проблемы, как определение природы ядра атома. Так или иначе, рассмотренное обобщение было сделано сравнительно недавно, и, может быть, основные выводы еще впереди.

Возрождение гипотезы Праута

Как уже отмечалось, Астону практически с самого начала удалось установить, что массы всех изотопов примерно равны целым числам (по отношению к эталонной массе кислорода 16). Тем самым он возродил в современном виде гипотезу Праута, согласно которой все атомы состоят из одного и того же первичного вещества — протила. Кроме того, после достижения максимальной точности измерения (о чем речь шла выше) было установлено, что отклонения атомных масс от целых чисел носят регулярный характер и наблюдаются от начала и до конца периодической системы как последовательного ряда, в котором каждый элемент сохраняет характерные черты своего предшественника; это также значительно расширило данную концепцию, распространив ее на внутреннее строение ядра атома. Однако уже к описываемому нами периоду, благодаря растущему признанию закона эквивалентности Эйнштейна, эти несоизмеримо малые отклонения приобрели чрезвычайную важность, поскольку они в простейшем виде показывают энергию, которая поглощается или высвобождается при переходе от одного элемента к другим.

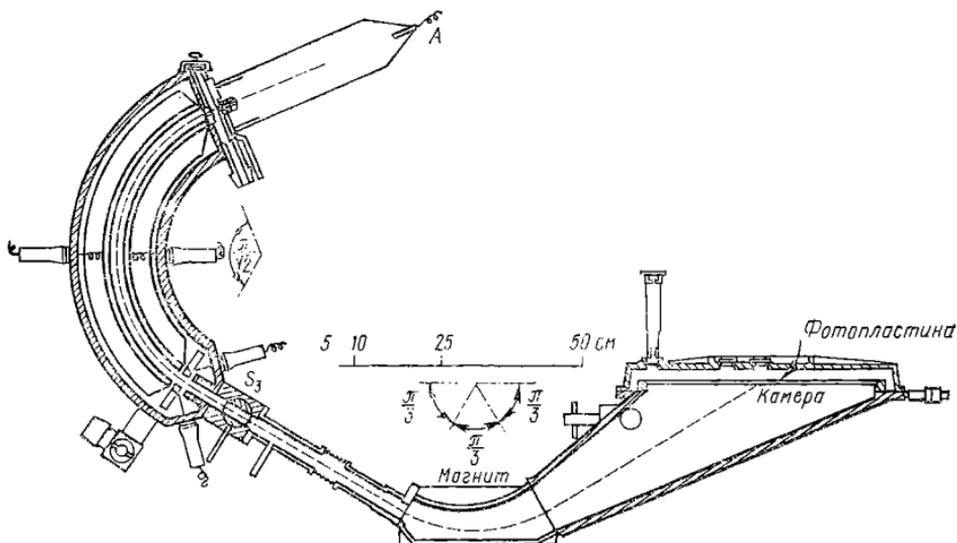


Рис. 68. Двухфокусный масс-спектрограф Бейнбриджа и Иордана

На рис. 68 схематично изображен двухфокусный масс-спектрограф, сконструированный учеными Гарвардского университета Бейнбриджем и Иорданом и являющийся, вероятно, наиболее совершенным из всех подобных приборов, которые были когда-либо созданы. Эта иллюстрация расположена в вертикальной плоскости, и, таким образом, массивный электромагнит, изображенный внизу рисунка, служит опорой всего прибора. Положительно заряженные ионы, необходимые для проведения опыта, генерируются в стеклянной газоразрядной трубке (верхний левый угол рисунка), а справа изображена фотографическая пластинка, обращенная светочувствительным слоем вниз. Вся система находится в высоком вакууме. Сначала электростатическое отклонение ионов достигается пропусканием их через изогнутый конденсатор, пластины которого представляют собой концентрические цилиндры, изогнутые под углом в $\pi/\sqrt{2}$ (127°) по отношению к первоначальному направлению движения ионов. Таким образом, конденсатор рассеивает поток ионов, незначительно отклоняя их от первоначальной траектории соответственно их энергии в энергетическом спектре. Далее они проходят сквозь широкое отверстие S_3 , преодолевают по прямой расстояние 44 см и, попадая в электромагнит, принимают форму конического луча и отклоняются на 60° (аналогично предыду-

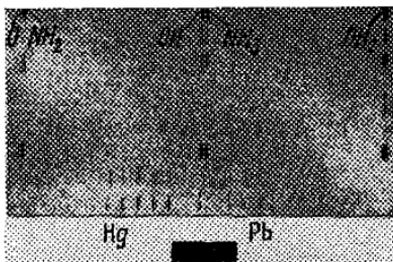


Рис. 69. Масс-спектр, полученный с помощью прибора Бейнбриджа и Йордана

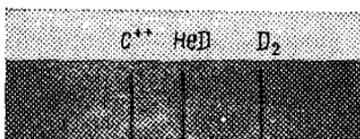


Рис. 70. «Согласованный триплет» с массовым числом 6 (X5)

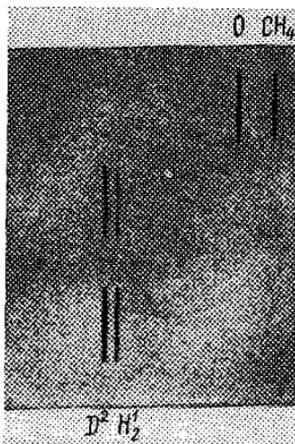


Рис. 71. «Согласованные дуплеты» с массовым числом 16 (сверху) и с массовым числом 2 (внизу) (X5)

щему отклонению на 127°). В результате этого опыта пучок ионов фокусируется на расположенной в масс-спектрографе фотопластинке прямо пропорционально (слева направо) отношению массы к заряду ионов. Разрешающая способность прибора оказалась настолько высока, что получившиеся фотографии можно было увеличить в пять раз без какой-либо потери резкости снимков. Для этого необходимо, чтобы путь, проходимый ионами, был равен 1,5 м и, кроме того, вакуум должен быть порядка $1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.

На рис. 69 приведена фотография, полученная с помощью масс-спектрографа Бейнбриджа и Йордана. Центральный дуплет соответствует массовому числу 17, складывающемуся из OH^+ и NH_3^+ ; слева от него — массовое число 16 (O^+ и NH_2^+), а справа — массовое число 18 (OH_2^+). Расстояние между частями дуплета позволяет вычислить коэффициент Астона для азота и водорода. На нижней части рисунка показаны следы изотопов ртути (слева) и свинца (справа), полученные под воздействием двух полей — электрического и магнитного. Черный прямоугольник, расположенный под основным снимком, соответствует по ширине отдельной линии в ее первоначальном виде, т. е. без повторного фокусирования полученного спектра энергии с помощью магнита.

На рис. 70 воспроизведен пятикратно увеличенный снимок «согласованного триплета» с массовым числом 6, куда входят двухзарядный ион углерод a (слева), однозарядные трехатомные молекулы дейтерия — D_2 (справа) и атом дейтерия, примыкающий к атому гелия (в центре). На рис. 71 приведена подобная фотография для массового числа 16 (вверху). Этот снимок демонстрирует разницу в массе между атомом кислорода и молекулой метана (CH_4); что же касается нижнего дуплета, то он показывает разницу в массе между атомом дейтерия и молекулой водорода (H_2), имеющими массовое число 2.

Уже первый прибор, сконструированный Астоном, не уступал по точности самым совершенным методам определения химической атомной массы; все последующие приборы позволили произвести еще более точные измерения. И каждый, у кого хватит воображения постичь степень точности измерений, отображенных, например, на рис. 70 и 71, охотно согласится с тем, что масс-спектрограф, по всей видимости, является самым замечательным измерительным прибором, когда-либо созданным человеком.

Коэффициент Астона

Отклонение от целых чисел Астон назвал упаковочным коэффициентом. В наши дни, после того как был открыт нейтрон, этот термин вводит в заблуждение и нуждается в замене, поскольку масса нейтрона (1,009) превышает общую массу протона (1,008) и электрона (0,0005), а не уступает ей, тогда как в период введения данного термина считалось, что уменьшение массы объясняется уплотнением (например, гелия по сравнению с четырьмя атомами водорода). Астон умер в ноябре 1945 г., однако еще задолго до этого автор книги предпочитал применять термин *коэффициент Астона*, и нет сомнения в том, что в наши дни именно он и должен применяться. Под этим термином следует понимать малое отклонение от целых чисел — порядка 0,0001 массы изотопа. Их абсолютное значение до некоторой степени зависит от выбранного эталона, однако это не играет большой роли. На практике для этих целей за физический эталон берется кислород с массовым числом 16, соответствующим массе чистого изотопа, который преимущественно содержится в элементе. Отсюда из природной смеси трех изотопов (16, 17 и 18) и выводится химическая атомная масса, равная 16, 0043.

Общий порядок отклонения можно представить следующим образом. Для водорода коэффициент Астона относительно велик, затем он быстро уменьшается и, естественно, при массовом числе 16 равен 0. В дальнейшем он приобретает небольшое отрицательное значение, достигающее минимума при массе 55—60, вновь увеличивается до нуля при массе 207 (свинец), а для всех последую-

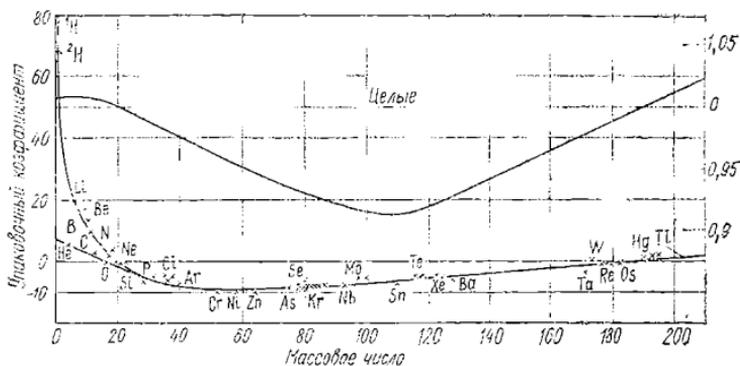


Рис. 72. Взаимосвязь между массовым числом и коэффициентом Астона

щих радиоактивных элементов опять имеет ярко выраженное положительное значение. Так, для урана множитель Астона равен +3,7, а для тория +3,0. Это означает, что при полном распаде этих элементов на свинец и гелий общий выход энергии равен соответственно 54 и 43,6 Мэв, что вполне согласуется с результатами экспериментов.

На рис. 72 приведена диаграмма, отражающая взаимосвязь между массовыми числами и коэффициентом Астона. Нижняя кривая, относящаяся к левой вертикальной шкале, показывает выраженный в десятитысячных долях коэффициент Астона, показывающий отклонения массовых чисел, обозначенных делениями на горизонтальной шкале, от целочисленных значений. Для всех элементов, за исключением He, C и O (числа, кратные 4), кривая имеет почти гиперболическую форму. Пересекая нулевую отметку на уровне фтора (массовое число 19), она примерно с этой точки круто уходит влево вверх в направлении водорода, а в направлении направо достигает своей самой низкой точки на уровне элементов группы железа. Далее кривая медленно поднимается вправо, достигая нуля на уровне ртути и переходя в область положительных значений для радиоэлементов (они в диаграмму не включены). Верхняя кривая относится к правой шкале, являющейся для нее вертикальной осью, и показывает фактические отклонения точных масс изотопов от целочисленных значений, причем правая часть кривой имеет весьма приблизительный характер.

Внимание Астона привлек тот факт, что самая низкая точка первой кривой приходится на район железа (его некоторые ученые считают наиболее распространенным элементом на Земле), а вторая кривая ниже всего опускается на уровне олова, которое име-

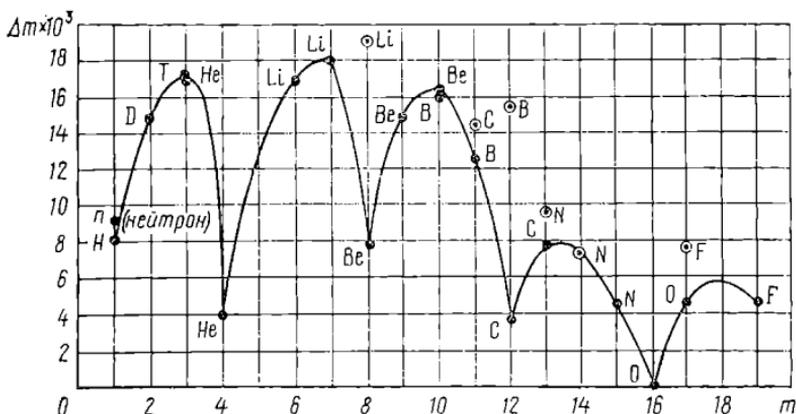


Рис. 73. Выведенная Олифантом кривая различий между массами изотопов и минимальными значениями коэффициента Астона

ет максимальное (по сравнению с другими элементами) число изотопов.

Если рассматривать график в обратном направлении, т. е. начиная со свинца, то мы увидим, что коэффициент Астона постепенно принимает отрицательные значения, достигая минимума (—10) где-то на уровне между хромом и никелем, а затем вновь доходит до нуля на уровне эталонного числа 16 (кислород). Начиная с этой точки бросается в глаза огромная разница в значениях коэффициентов Астона для нечетных и четных элементов. Значения его для нечетных азота +5,4; бора +11,7; лития +26; водорода +81,2; для четных элементов, за исключением бериллия, значение коэффициента Астона возрастает гораздо медленнее (углерод +3,2; бериллий +16,6; гелий +10,2). И вот эти-то малые значения и являются истинными путеводителями по лабиринтам современной алхимии.

Олифант доказал, что если обрисованную нами вкратце взаимосвязь между массовыми числами и коэффициентом Астона с большой точностью изобразить в виде кривой, то ее минимумы совпадут с массовыми числами, кратными 4. В этом заключается одно из многочисленных свидетельств того, что гелий, по крайней мере, потенциально или в «зачаточной» форме является составной частью ядра атома. На рис. 73 изображена выведенная Олифантом кривая различий между массами изотопов и минимальными значениями коэффициента Астона для элементов с массовыми числами, большими 20 и кратными 4. Большие кружки на этом рисунке соответствуют нестабильным атомам. Особое внимание следует

обратить на положение нестабильного изотопа лития с массовым числом 8, характерное для элементов с наибольшим запасом энергии.

Необходимо также отметить, что коэффициент Астона для водорода является наивысшим. В частности, он более чем в три раза превышает следующий за ним коэффициент для лития, который, в свою очередь (за исключением бериллия), в два раза больше третьего по значению коэффициента для бора. А коэффициент Астона самого бора в два раза больше, чем любого другого элемента. Этого оказалось вполне достаточно для того, чтобы в качестве наиболее доступных объектов осуществления искусственной трансмутации выделить легкие элементы с четным атомным числом, а также бериллий. И вскоре правильность этого вывода была подтверждена на практике.

Первая искусственная трансмутация

28 апреля 1932 г. на заседании Королевского общества Резерфорд объявил о том, что сотрудники Кавендишской лаборатории Дж. Д. Кокрофт и Е. Т. С. Уолтон успешно осуществили расщепление ядер атомов лития и других легких элементов с помощью протонов, искусственно полученных в условиях высокого электрического напряжения.

Тогда наиболее удивительным казалось, что для этого потребовалось сравнительно невысокое напряжение. Установленный для проведения опыта генератор мог обеспечить напряжение порядка 750 кВ, однако процесс расщепления начался уже при напряжении, в шесть раз меньшем. Правда, позднее, заменив протоны дейтонами (атомами изотопа водорода с массой 2), Резерфорд отодвинул точку начала реакции на уровень 20 — 40 кВ — напряжение, которое вполне может быть обеспечено небольшим индуктором для генерирования рентгеновского излучения.

Для генерирования протонов использовалась изготовленная с расчетом на высокое напряжение заполненная водородом электронная лампа продолговатой формы. На выходе лампы находилось окошко из тончайшего слоя слюды, проникая сквозь которое протоны сталкивались с атомом бомбардируемого элемента. Было подсчитано, что скорость протонов достигала $\frac{1}{30}$ скорости света, а длина их пробега в воздухе равна всего 1 см. За бомбардируемым веществом следили по мерцанию сернистого цинка сквозь экран, поглощавший протоны. При напряжении 125 кВ начали появляться яркие мерцания, абсолютно схожие с теми, которые вызывались самыми быстрыми из обычных α -частиц тория. По мере увеличения напряжения увеличивалось и количество мерцаний, однако при этом длина пробега протонов и яркость оставались без из-

менений. При напряжении 400 кВ было насчитано несколько сот мерцаний в минуту. При напряжении 250 кВ одно мерцание приходилось примерно на 1 млрд. протонов.

Расщепление ядра лития

Следует, однако, отметить, что кинетическая энергия протона в шесть раз уступает энергии образующихся α -частиц. Именно это обстоятельство и позволило сделать вывод, что протоны только способствовали началу реакции и высвободили энергию из ядра атома лития. Было также доказано, что мерцания вызываются различными α -частицами с энергией 8,76 Мэв, которые практически аналогичны α -частицам, испускаемым торием и проходящим в воздухе расстояние 8,6 см; они несколько быстрее α -частиц радия с пробегом 7 см. Несмотря на то, что в наши дни термин *расщепление* приобрел специфическое значение и применяется для обозначения нового вида распада, претерпеваемого при определенных обстоятельствах атомами урана и тория, описанный нами процесс искусственного распада лития все же представлял собой ярко выраженное расщепление.

Ядро лития с массовым числом 7 соединяется с протоном, массовое число которого равно 1. При этом сразу же образуется неустойчивый изотоп бериллия с массовым числом 8, который мгновенно распадается на равные части и испускает две α -частицы, или ядра гелия. В ходе этого процесса, т. е. при получении 8 г гелия из 7 г лития и 1 г водорода, происходит потеря примерно 0,00181 г, эквивалентная 17,1 Мэв; это объясняется тем, что значение коэффициента Астона для водорода и лития намного больше, чем для гелия. Такой результат вполне соответствует выводу, что каждая частица получает энергию 8,76 Мэв, особенно если прибавить кинетическую энергию бомбардирующего ее протона.

Кроме того, некоторые из неустойчивых ядер бериллия, полученных из лития, испускают перед расщеплением γ -фотон с энергией не меньше 17 Мэв (что в то время считалось беспрецедентной энергией для этого вида излучения); при самом же расщеплении, в результате которого образуются два атома гелия, выделяется относительно небольшое количество энергии. При бомбардировке дейтонами изотоп лития с массой 6 ведет себя примерно так же, как и изотоп этого элемента с массой 7 при нейтронной бомбардировке, но при этом высвобождается даже большее количество энергии, а именно 22 Мэв.

Выделение энергии из лития

Интересно отметить, что при одинаковых массах энергия, равная 17 Мэв, в десять раз превышает энергию полного распада урана и тория в свинец и гелий, если этот распад происходит естест-

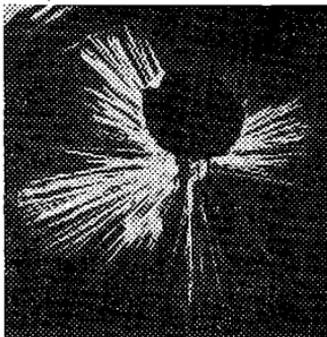


Рис. 74. Бомбардировка лития протонами

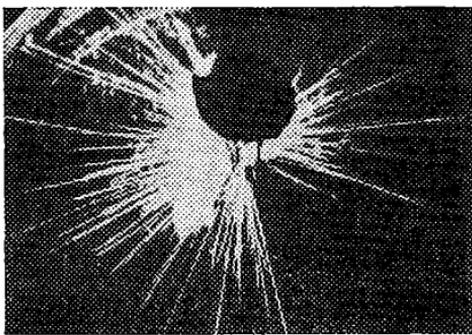


Рис. 75. Бомбардировка лития дейтронами

венным путем, и в два раза превышает энергию, выделяющуюся при их искусственном делении (следует, однако, сделать оговорку, что в последнем случае делению подвергается менее 1% всей массы вещества). В процессе синтеза гелия из водорода, рассмотренном выше, выделяется в четыре раза больше энергии, чем при расщеплении лития. Однако, если оставить в стороне эти случаи, можно с уверенностью сказать, что, расщепляя литий протонами или дейтронами, можно получить при прочих равных условиях больше энергии, чем при каком-либо другом доступном трансмутационном изменении (речь, естественно, не идет о полной аннигиляции вещества и превращении его в энергию). По мнению автора, если когда-либо атомная энергия и войдет в нашу повседневную экономическую жизнь, то произойдет это за счет крупномасштабной искусственной трансмутации легких, а не тяжелых элементов, которая уже осуществлена на практике. (Следует, однако, признать, что сегодня мы, насколько известно, так же далеки от этой цели, как и в 1932 г.) Такой вывод основан на том, что в ходе рассмотренных нами первоначальных исследований похожие результаты были получены по бериллию, бору, углероду, фтору и алюминию, хотя, как и следовало ожидать, длина пробега частиц, выбитых из этих элементов, гораздо меньше, чем у лития, и для осуществления их трансмутации требуется намного большее напряжение.

На рис. 74 и 75 воспроизведены фотографии, полученные с помощью камеры Вильсона Ди и Уолтоном и иллюстрирующие процесс искусственной трансмутации лития. На рис. 74 изображена бомбардировка литиевой мишени протонами. В данном случае изотоп лития с массой 7 соединяется с протоном и образует неустойчивый изотоп бериллия с массой 8, который, в свою очередь, рас-

падает на две α -частицы с одинаковой длиной пробега. На рис. 75 показана бомбардировка лития дейтонами. Здесь изотопы лития с массой 6 соединяются с дейтонами, образуя, как и при бомбардировке протонами, неустойчивый изотоп бериллия, который распадается на две α -частицы, проходящие в воздухе расстояние 13 см; при этом выделяется гораздо больше энергии, чем в первом случае. Как видно из фотографии, иногда бывает и так, что один из нейтронов, входящих в дейтон, соединяется с ядром лития, при этом образуется изотоп с массовым числом 7 и испускается протон, который, пересекая камеру, оставляет более слабый след. Что же касается изотопа с массовым числом 7, то он образует нейтроны и α -частицы с различной длиной пробега (вплоть до 8 см), которые также хорошо видны на фотографии.

Таким образом, расщепление лития можно осуществить самыми различными способами, о которых мы, к сожалению, не имеем возможности рассказать здесь более подробно.

Глава десятая. НОВЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОТКРЫТИЯ И МЕТОДЫ

Чудесный год радиоактивности

Осуществление полностью искусственной трансмутации на уровне отдельного атома, только что рассмотренное нами на примере лития и других легких элементов, было тем рубиконом, который человечество, начиная с древнейших времен, безуспешно пыталось перейти. Однако оно явилось лишь одним из четырех великих открытий, сделанных в 1932 г., благодаря которым этот год был назван чудесным годом радиоактивности. Во-первых, помимо осуществления искусственной трансмутации был наконец-то обнаружен положительно заряженный электрон, или *позитрон*; в противоположность ему отрицательный электрон с тех пор получил название негатрон*. Во-вторых, был открыт *нейтрон* — незаряженная элементарная частица с массой 1 (единица), которую можно рассматривать как нейтральное ядро, только без внешнего электрона. И наконец, был открыт изотоп водорода с массой 2, названный *тяжелым водородом*, или *дейтерием*, ядро которого, как считается, состоит из протона p и нейтрона n ; подобно обычному водороду, его атом имеет один внешний электрон. В следующем, 1933, году произошло еще одно открытие, которое в некотором роде (во всяком случае, по мнению первых исследователей атомной энергии)

* Ниже в книге всюду будет использован традиционный термин *электрон*. Термин «негатрон» не прижился в науке. — *Прим. ред.*

представляло наибольший интерес. Речь идет об открытии явления искусственной радиоактивности.

Большинство из этих открытий были сделаны с помощью описанных выше методов исследования отдельных атомов, хотя они для этого и не предназначались.

Электронная пара

Первым позитрон обнаружил сотрудник Калифорнийского технологического института Карл Андерсон. Позитрон предстал перед ученым в камере Вильсона в виде электронной пары в следах космического излучения, подвергнутого воздействию магнитного поля с целью вызвать отклонение заряженных частиц. Электронная пара оставляла за собой два совершенно аналогичных следа, отклонившиеся от своего общего первоначального пути в противоположных друг к другу направлениях, что было вызвано наличием у двух похожих как две капли воды электронов противоположных зарядов. После того как аналогичные результаты были получены англичанами Блэкеттом и Оккиалини, Андерсон продемонстрировал «земной» характер этого явления и доказал, что появление электронных пар является нормальным следствием взаимодействия достаточно мощного γ -излучения с атомами тяжелых элементов. Для любого γ -кванта с энергией, намного превышающей 1 Мэв (рассматриваемой как критическая энергия), количество появляющихся электронных пар возрастало пропорционально квадрату атомного номера, или ядерного заряда облучаемого элемента. Как и нейтрон, позитрон оказался трудноуловимой частицей, поскольку он легко соединяется с электронами или с ядрами. Поэтому в свободном состоянии он менее долговечен, чем даже электрон.

Расщепление фотона

Считается, что соединение позитрона с электроном является результатом процесса, обратного тому, при котором позитрон был обнаружен, так как в зависимости от энергетических условий соотношение

$$\gamma\text{-квант} = e^+ + e^-$$

имеет обратимый характер. Энергетический эквивалент массы электрона равен $0,5 \text{ Мэв}$, поэтому для сохранения импульса необходимо, чтобы электроны генерировались парами, чем и объясняется тот факт, что критическая энергия производящего электронные пары γ -излучения равна 1 Мэв . Этот процесс нередко называют материализацией фотона, хотя его скорее следовало бы называть «электризацией» фотона. Если все это соответствует дейст-

вительности, то мы имеем дело с подлинной аннигиляцией массы, и наоборот, с ее появлением из энергии. По мнению автора, применительно к рассмотренным явлениям данное предположение звучит весьма обоснованно.

Создается впечатление, что современная физика с некоторым запозданием дает должную оценку тем фундаментальным и революционирующим выводам, которые можно сделать из этой двусторонней связи, существующей между фотоном большой энергии и электронной парой. Вероятно, виной тому — внесенная в науку путаница по вопросу о различии между квантом действия и квантом энергии (или импульсом). Однако посторонний наблюдатель, которому, как известно, видна практически полная картина, рассматривает это открытие как одно из наиболее убедительных достижений в области изучения природы света и установления взаимоотношения между электричеством, материей и энергией. Дело в том, что, исходя из приведенного выше утверждения о природе кванта действия, согласно которому соединение (или слияние) положительного и отрицательного электрических зарядов осуществить на практике невозможно, вполне естественно было бы считать (как и делают в наши дни), что фотон похож на двойную звезду, состоящую из двух равных противоположных электрических зарядов, которые вращаются вокруг своего общего центра притяжения. И опять-таки, как говорилось выше, это объясняется волнообразной природой частицы, поскольку построенная таким образом система окружена электромагнитной волной, которая неотступно следует за ней. Видимо, этим обстоятельством объясняется и то, что волна состоит из частиц, а не из распространяющихся сферически импульсов.

Наблюдение за процессом расщепления вещества фотонами, обладающими высокой энергией, позволяет сделать важный вывод, заключающийся в том, что проникающая способность γ -излучения тяжелых элементов, которая вначале увеличивается пропорционально росту энергии этого излучения и достигает максимума при энергии 3 Мэв (это является практически наивысшим значением для γ -излучения природных радиоэлементов) и затем идет на убыль. Так, поглощение свинцом γ -излучения энергией 10 Мэв объясняется в основном данным процессом. Открытие этого эффекта сделало со временем недействительными многие предыдущие выводы о природе космического излучения.

Нейтрон

Нейтрон впервые наблюдали Боте и Беккер в 1930 г., причем произошло это при очень любопытных обстоятельствах. Ученые нашли, что при столкновении α -частиц полония с атомами лития, бора, и в особенности бериллия, возникает эффект, принятый ими

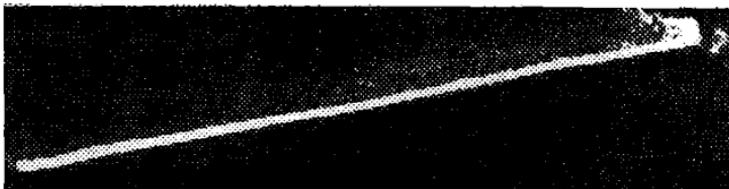


Рис. 76. Расщепление атома азота нейтронами

вначале за γ -излучение с беспрецедентной для того времени проникающей способностью: для уменьшения интенсивности излучения в два раза требовался слой свинца толщиной 2,5 см. Однако, повторив этот опыт, супруги Жоллио (дочь и зять супругов Кюри) установили, что это излучение легко поглощается такими содержащими водород веществами, как парафин и вода, и выбивает из них быстрые протоны с длиной пробега в воздухе 26 см и энергией 4,3 Мэв. Затем, в 1932 г., Джеймс Чедвик обнаружил, что при столкновении с этими протонами ядра легких элементов резко отскакивают назад, и, благодаря интенсивному выделению энергии, за ними можно наблюдать по оставляемым ими следам в камере Вильсона. Именно Чедвик первый пришел к правильному выводу, согласно которому описанные выше эффекты вызываются не фотонами, а происходят благодаря выделению быстрых нейтронов.

Открытию нейтрона благоприятствовало то, что полоний испускает только α -частицы с довольно невысокой скоростью и небольшой длиной пробега, и если бы в качестве источника излучения использовался какой-либо другой элемент, то наблюдаемый крайне незначительный эффект, вероятно, был бы перечеркнут вторичными эффектами, производимыми более мощными излучениями, и, таким образом, остался бы неоткрытым.

На рис. 76 воспроизведен полученный профессором П. И. Динским с помощью камеры Вильсона. Оставленные нейтронами следы начинаются «ниоткуда», поскольку сам нейтрон дает след только в том случае, если на своем пути он сталкивается с атомом, который, отлетая после столкновения, ионизует окружающий газ. На снимке видна картина столкновения ядра атома азота с невидимым нейтроном, в результате чего ядро азота распадается на атом бора (оставляющий короткий след) и атом гелия, или α -частицу, оставляющую длинный след. Этот процесс можно условно записать в виде: ${}^{14}_7\text{N}(n, \alpha){}^{11}_5\text{B}$ (подробное объяснение дано ниже в данной главе).

Следует, однако, отметить, что еще за 12 лет до этого, в 1920 г., Резерфорд указал на возможность существования как

нейтрона, так и дейтона и с замечательной точностью предсказал их вероятные свойства. Он предвидел, что нейтрон — это лишенное электронов ядро массой 1 и нулевым зарядом, способное, благодаря своей незаряженности, проникать сквозь вещество и внешнее электронное окружение атомов, а следовательно, и сквозь стенки закупоренных сосудов; по мнению Резерфорда, нейтрон либо легко соединяется с ядрами других элементов, либо разрушает их, либо сам расщепляется в их интенсивном поле, испуская протон или электрон, а то и оба сразу. Как показала жизнь, все эти предсказания соответствовали действительности и, более того, они явились ключом к осуществлению трансмутации в широких масштабах.

И все же наряду с этим имеется одно немаловажное различие. Резерфорд считал, что по своему происхождению нейтрон представляет собой соединение протона с отрицательно заряженным электроном. В наши дни нейтрон считается элементарным протилом — мельчайшей составной частью всей материи, а под протоном принято понимать соединение нейтрона с позитроном. Такая точка зрения основывается на том, что масса нейтрона (1,009) больше массы протона и электрона, вместе взятых (соответственно 1,008 и 0,0005). В то же время, если придерживаться взглядов Резерфорда, то масса нейтрона должна уступать сумме масс протона и электрона, поскольку в таком случае происходило бы высвобождение энергии и потеря массы.

Новое ядро

Итак, только с открытием нейтрона и позитрона стало возможным правильно объяснить структуру ядра атома. Раньше, для того чтобы объяснить явление испускания радиоэлементами β -частиц, ученым приходилось исходить из предположения, что электрон, как и протон, является частью ядра. Вполне очевидно, что в таком случае масса M должна складываться из некоего количества протонов M , равного атомной массе, и — поскольку величина положительного заряда равна атомному номеру Z — из количества электронов, равного массовому числу минус атомный номер, т. е. $M - Z$. Получается, что у более тяжелых элементов количество электронов значительно превышает чистый положительный заряд, выраженный атомным номером. Но поскольку ядро ничтожно мало и устойчиво, эта точка зрения никогда не внушала особого доверия.

В наши дни не требуется предполагать, что в ядре вообще содержатся электроны. Ядро атома можно считать — и именно так оно и рассматривается — соединением протонов, равных по коли-

честву атомному номеру* Z , с таким количеством нейтронов, которое вместе с протонами составит атомную массу или массовое число M ; число нейтронов равно разнице между двумя числами ($M - Z$). Для более тяжелых элементов, по мере возрастания их массы, количество нейтронов все больше превышает количество протонов. Отсюда можно сделать вывод, что (по арифметическим причинам) именно поэтому ядерное деление, при котором высвобождаются свободные нейтроны, сделало искусственную трансмутацию вещества практически используемой, в то время как обычное искусственное расщепление до сих пор удавалось осуществить лишь для отдельных атомов.

Вместе с тем до сих пор подвергается сомнению правильность объяснения с этой точки зрения происхождения уже упоминавшихся выше β -частиц. Такое объяснение возможно, если предположить, что γ -квант, перед тем как покинуть ядро, претерпевает внезапное превращение, распадаясь на электрон (искускаемый как β -частица) и позитрон, который, соединяясь в ядре с нейтроном, образует протон. Однако существует и альтернативная точка зрения (выдвинутая теоретиком Г. Гамовым), согласно которой в ядре может существовать отрицательно заряженный протон — двойник известного ныне протона, находящийся к нему в таком же отношении, в каком позитрон находится к открытому ранее электрону. Данная гипотеза имеет некоторые преимущества, однако отрицательный протон пока еще никому не удалось открыть.

Может показаться, что автор слишком подробно остановился на чрезвычайно простых идеях, и все же читателю следует набраться терпения, поскольку их правильное восприятие значительно облегчит последующее рассмотрение современных взглядов на природу ядра.

Тяжелый водород

Переходя к вопросу об открытии тяжелого водорода, мы вновь возвращаемся к первоисточнику информации о массе ядра — изотопам. Однако в данном случае нам придется иметь дело с изотопом, никак непохожим по своим физико-химическим и физическим характеристикам на любой другой изотоп. Это отличие проявляется, в частности, в том, что по своим свойствам тяжелый водород настолько сильно отличается от простого водорода, что его можно сравнительно легко выделить в чистом виде. Как и предсказывал Резерфорд, тяжелый водород представляет собой атом, ядро которого состоит из протона и нейтрона (pn) и который, как и обычный атом водорода, имеет снаружи только один электрон.

* Здесь и ниже для обозначения порядкового номера элемента использован традиционный символ Z (Содди использовал N , ныне обозначающий число нейтронов в атоме). — *Прим. ред.*

Открытие тяжелого водорода произошло довольно любопытно и несколько напоминает историю открытия аргона. Первоначально соотношения атомных масс водорода и кислорода, полученных химическим и масс-спектрографическим анализом, практически полностью совпадали, однако это совпадение было обманчивым. Как известно, аргон обнаружили благодаря отклонениям от точного значения атомной массы азота (путем измерения его плотности: плотность азота, содержащегося в атмосфере, превышает плотность этого элемента в азотных соединениях). Что же касается тяжелого водорода, то своим открытием он обязан случайному соответствию результатов химического и физического методов определения атомной массы водорода по отношению к атомной массе кислорода.

Полосатые спектры изотопов

Нельзя не отметить, что, за исключением тяжелого водорода, идентичность свойств изотопов распространяется и на их линейчатые спектры (атомные спектры), которые настолько схожи, что с помощью обычных методов их невозможно отличить друг от друга. Однако совсем иначе обстоит дело с полосатыми—молекулярными—спектрами, так как в них массы составляющих молекулу атомов входят в величину, определяющую длину волны. В то время, когда масс-спектрограф еще не достиг своего нынешнего совершенства, полосатые спектры использовались для обнаружения ничтожно малого количества более тяжелых изотопов таких простых элементов, как углерод, азот и кислород, что невозможно было сделать с помощью существовавших тогда масс-спектрографов. Было установлено, что помимо основного изотопа с массовым числом 16 кислород содержит $1/600$ изотопа с массовым числом 18 и $1/2500$ изотопа с массовым числом 17. По аналогии с кислородом ученые пришли к выводу, что водород должен также содержать около $1/45000$ изотопа с массой 2, который способствовал бы достижению уже упомянутого близкого соответствия между химическим и физическим соотношением масс. Такое предсказание было сделано Бирге и Мензелем и почти сразу же, к 1932 г., было проверено на практике американским ученым Г. Юри, который обнаружил, что при электролизе воды тяжелый изотоп концентрируется в той ее части, которая не подвергается электролизу. Вплоть до начала второй мировой войны именно этим методом производилась на норвежских гидроэлектростанциях чистая тяжелая вода (D_2O), поступавшая в большом количестве в продажу для научных исследований.

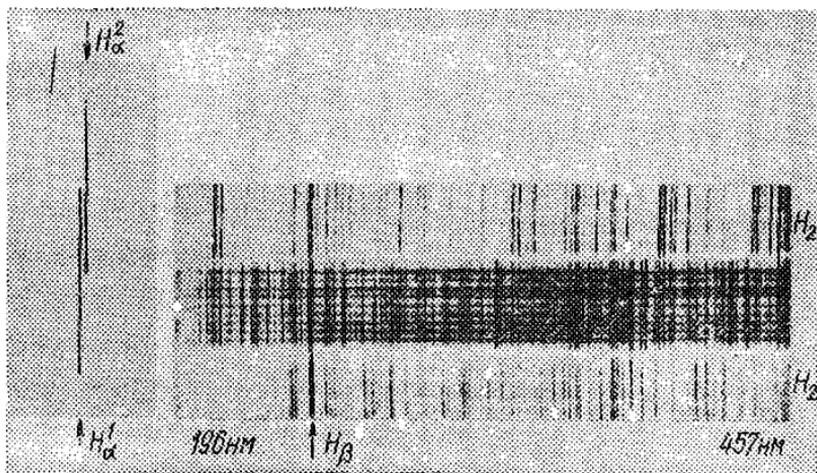


Рис. 77. Линейчатый спектр водорода (внизу) и дейтерия (вверху)

Свойства тяжелой воды

Тяжелая вода имеет температуру замерзания на $3,8^{\circ}\text{C}$ и температуру кипения на $1,2^{\circ}\text{C}$ более высокую, чем обычная вода; ее максимальная плотность выше на 10%, причем достигается такая плотность при температуре $11,5^{\circ}\text{C}$, а не 4°C , как у обыкновенной воды. Но особый интерес представляет небольшое, но хорошо заметное смещение полосатого спектра D к фиолетовой области спектра обычного водорода. Более того, это смещение находится в полном соответствии с очень простым расчетом из теории водородного спектра Бора, принимающей во внимание смещение центра тяжести атома, вокруг которого вращается электрон. Полосатый спектр дейтерия полностью отличен от спектра обычного водорода, а 50%-ная смесь этих двух элементов демонстрирует не только спектры двух чистых веществ D—D и H—H, но и третий, такой же сильный, спектр, соответствующий молекуле D—H. На полосатые спектры, как на способ изучения изотопов, впервые обратили внимание именно после того, как эта бросающаяся в глаза разница спектров была замечена у хлора — первого из обычных элементов, подвергнувшегося разложению на масс-спектрографе.

Наиболее ценным свойством дейтона является его способность выступать в роли бомбардирующего агента, вызывающего трансмутацию. Выступая в этой роли при искусственном расщеплении, он действует как разорвавшийся снаряд, а не как дробь, зачастую распадаясь на составляющие его компоненты; причем один из

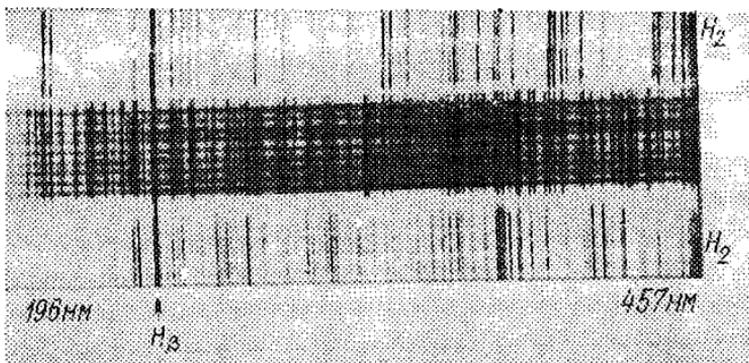


Рис. 78. Полосатые спектры водорода (вверху), дейтерия (внизу) и 50%-ной смеси этих элементов (в центре)

них — либо протон, либо нейтрон — может соединиться с бомбардируемым ядром, а другой выталкивается.

На рис. 77 красная линия, или α -линия, спектра водорода сопоставляется с аналогичной линией для дейтерия. Вторая из них смещена в направлении фиолетовой области на $1,78 \text{ \AA}$ (это значение точно вычислено по теории Бора как результат смещения общего центра тяжести ядра и электрона). Обе линии легко поддаются разрешению обычным спектроскопом. На рис. 78 изображены полосатые спектры двухатомной молекулы H_2 . Верхний спектр соответствует обычному водороду, нижний — чистому дейтерию; средний спектр — 50%-ной смеси этих двух элементов — помимо уже упомянутых двух спектров имеет еще и третий, соответствующий $H-D$, в молекулу которого входит по одному атому каждого элемента. Оригиналы снимков, воспроизведенных на рис. 77 и 78, были сделаны немецким исследователем Г. Герцем, который впервые применил диффузию для выделения газообразных изотопов и значительно усовершенствовал уже известные методы решения данной задачи.

Водород и энергия при абсолютном нуле

Следует, однако, отметить, что различия, существующие между химическими и физическими свойствами изотопов водорода, нельзя объяснить только относительной разницей их масс (от 2 до 1), поскольку эта разница намного больше, чем в любом другом случае. Как отметил Поляны, они скорее принадлежат к области квантовой механики, которая исходит из идентичности хи-

мических свойств двух атомов. Причиной этого является так называемая энергия абсолютного нуля (в данном случае имеется в виду энергия соединения, а не свободного атома), т. е. энергия колебаний при температуре, равной абсолютному нулю. Энергия возрастает по мере увеличения в молекуле сил притяжения, объединяющих атомы в молекулу, а также по мере уменьшения масс атомов. Оба эти фактора увеличивают частоту данных колебаний и, следовательно, квант энергии $h\nu$, соответствующий кванту действия. Из этого вытекает, во-первых, что разница в количестве энергии (при абсолютном нуле) возрастает не как относительное соотношение масс двух изотопов, а примерно как их квадрат, благодаря чему для изотопов водорода — в отличие от всех других изотопов — этот эффект имеет столь большое численное выражение; во-вторых, при выделении в чистом виде изотопов по последовательно проявляющимся мельчайшим различиям в их физико-химическом поведении легче всего отделить соединения, на образование которых из элементов уходит наибольшее количество тепла. Так, для водорода это фторид или хлорид, а не иодид. В наши дни используются гораздо более совершенные методы выделения изотопов водорода, чем те, что практиковались в период, когда производство изотопов в коммерческих целях еще только начиналось.

Система записи ядерных реакций

Необходимо пояснить простую стенографическую символику, с помощью которой современные ученые описывают изменения, происходящие в ядре. Вплоть до того момента, как получило признание деление ядра (а это произошло всего за один-два года до начала второй мировой войны), был известен лишь один вид ядерных изменений, а именно превращение (под воздействием налетающей заряженной частицы или нейтрона) одного ядра в другое с испусканием или без испускания при этом излучения или частицы. Этот процесс описывается четырехзначной символикой, в которой букв p , n , d , v , β , γ , e^+ , e^- вполне достаточно для обозначения всех происходящих изменений. Ядра обозначают химическими символами элементов; слева от символа записывают два числа: верхнее соответствует массовому числу (M), нижнее — атомному номеру, или положительному ядерному заряду (Z).

Таким образом, произведенное впервые Резерфордом расщепление ядра азота α -частицами с испусканием протона и образованием ядра кислорода с массовым числом 17 можно записать в этих символах так: ${}^7_{14}\text{N} (\alpha, p) {}^8_{17}\text{O}$. В скобках, находящихся между символами двух ядер, заключены расщепляющая частица и испускаемая частица, если таковая имеется.

Суть заключается в том, что реагирующие частицы в левой части и две получаемые частицы в правой части должны быть в сумме равны как по заряду, так и по массе. В данном случае отношение масс будет: $14+4=17+1$, а отношение положительных зарядов: $7+2=8+1$. По этой символике электрон, естественно, рассматривается как частица, обладающая зарядом -1 , а заряд нейтрона равен 0.

К 1945 г. ученым уже было известно свыше 400 первичных и 200 вторичных превращений, что и привело к созданию такой стенографической символики. Уже рассмотренное нами превращение бериллия, при котором впервые был открыт нейтрон, можно представить как ${}^9_4\text{Be}(\alpha, n){}^{12}_6\text{C}$, т. е., если следовать закону сохранения массы и заряда, мы должны будем признать, что в результате этого превращения получается углерод, поскольку соотношение масс и зарядов соответственно удовлетворяет равенствам: $9+4=12+1$ и $4+2=6+0$. Эти законы сохранения массы и заряда позволяют чрезвычайно просто описать превращение элементов. Вот чего вскоре после 1932 г. достигла наука, которую современные физики называют ядерной физикой!

Однако законы сохранения массы и заряда не имеют ничего общего с какой-либо специальной теорией атома, ядра и т. д. Сохранение электрического заряда, равно как и массы, при атомном превращении впервые показал именно закон радиоактивного смещения; объединение Эйнштейном законов сохранения массы и энергии также не вытекает из теории вещества. При наличии точных сведений об изотопической массе этот последний закон позволяет сразу же определить энергию, которая поглощается или высвобождается при любом превращении.

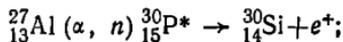
Таким образом, рассмотренный нами четырехзначный символизм является, вероятно, более концентрированным и информативным, чем любой другой.

Искусственная радиоактивность

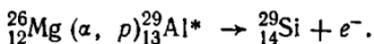
Возвратимся теперь к открытию в 1933—1934 гг. искусственной радиоактивности. Для одного из первых исследователей этой проблемы — М. Кюри — данное открытие представляло еще особый интерес: оно было сделано ее дочерью и зятем. М. Кюри имела счастье за несколько месяцев до своей смерти передать зажженный ею факел членам своей семьи. Предмет, который она превратила из диковины в колосс, через четверть века находился на пороге того, чтобы обрести новую, плодотворную жизнь.

Изучая упомянутый эффект Боте и Беккера, супруги Жолио обнаружили, что счетчик продолжал регистрировать импульсы даже после того, как был удален полоний, первоначально возбуж-

давший их. Эти импульсы прекращались точно таким же образом, как импульсы неустойчивого радиоэлемента с периодом полураспада 3 мин. Ученые установили, что алюминиевое окошко, через которое проходило α -излучение полония, само становилось радиоактивным благодаря генерируемым нейтронам; аналогичный эффект имел место для бора и магния, только наблюдались другие периоды полураспада (соответственно 11 и 2,5 мин). Реакции для алюминия и бора выглядели следующим образом:



где звездочки обозначают, что ядра, полученные сначала, радиоактивны и претерпевают указанные стрелками вторичные превращения, в результате которых образуются хорошо известные устойчивые изотопы кремния и углерода. Что же касается магния, то все три его изотопа (с массовыми числами 24, 25 и 26) участвуют в этой реакции, генерируя нейтроны, протоны, позитроны и электроны; в результате образуются хорошо известные устойчивые изотопы алюминия и кремния (превращения носят комбинированный характер):



Более того, с помощью обычных химических методов, используемых в радиохимии, удалось достаточно легко идентифицировать неустойчивые радиоактивные фосфор и азот.

Эти первые результаты демонстрировали богатство возможностей, открываемых вновь полученными данными. В дальнейшем мы будем использовать их в качестве иллюстрации тех несложных общих принципов, на которых, как теперь известно, основаны ядерные реакции.

Электротехника высокого напряжения

Однако прежде нам необходимо остановиться на освещении тех огромных достижений в области техники высокого напряжения, которые позволили быстро оставить далеко позади казавшиеся до тех пор недостижимыми уровни энергии, присущие природным радиоактивным элементам (мы уже видели, максимальная их

Энергия обычно не превышает 4 Мэв для однозарядных частиц и 8 Мэв — для двухзарядных). Были значительно улучшены старые электростатические методы генерирования тока высокого напряжения с помощью так называемых фрикционных и индукционных машин; были усовершенствованы используемые в промышленных целях трансформаторы переменного тока высокого напряжения. Следует, однако, отметить, что, хотя, работая с этими приборами, ученые и не ставят перед собой цели получить искусственную молнию, иногда она вспыхивает и этого трудно избежать. Чтобы исключить попадание электрического разряда в стены, крышу или землю, необходимо для такого генератора просторное здание. На практике это резко ограничивает использование таких аппаратов, позволяя получать на них напряжение не более 1—2 млн. в. Они по-прежнему используются для проведения некоторых исследований, однако, если необходимо получить только напряжение, вместо них сейчас намного чаще применяют циклотрон.

Циклотрон

Это в высшей степени оригинальная машина, усовершенствованная Е. О. Лоуренсом из университета Беркли в Калифорнии. Если оставить в стороне вопрос о стоимости циклотрона, единственным недостатком его можно считать то, что по мере роста скорости положительных ионов увеличивается их относительная масса. Думается, однако, что этот недостаток вполне преодолим. Циклотрон генерирует эти, обладающие высокой скоростью, положительные ионы сначала непосредственно внутри разреженной камеры, которая имеет форму плоской цилиндрической коробки, находящейся между двумя полюсами огромного электромагнита. Аппарат начинает работать, используя высокочастотный переменный ток такого напряжения, при котором другие приборы выходят из строя. Затем этот потенциал может быть многократно увеличен (надо отметить, что такие результаты удалось достичь только на последней модели этого аппарата). Десять лет назад с помощью циклотрона можно было получить протоны и дейтоны энергией 6 Мэв. Следующий, более мощный циклотрон позволил довести энергию протонов и дейтонов до 17 Мэв. Смело можно сказать, что эта энергия достигла бы 100, если бы удалось завершить до начала войны строительство циклотрона, на которое Институт Рокфеллера отпустил 1 млн. долларов (один только электромагнит ускорителя весит 5000 т). Однако эти средства пошли на создание атомной бомбы, а циклотрон, насколько известно автору, до сих пор так и не закончен. На рис. 79 изображена плоская круглая коробка, рассеченная на две половины (называемые дуантами), внутри которых генерируемые положительные ионы движутся по спирали от центра к краю. Каждый раз, пересекая пространство

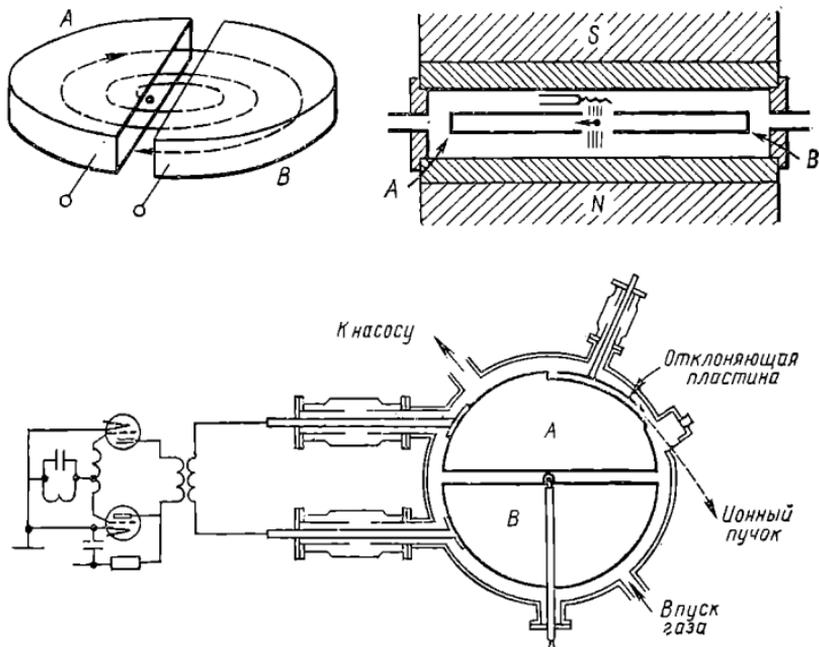


Рис. 79, 80, 81. Схемы, иллюстрирующие принцип действия циклотрона

между дуантами, ионы ускоряются. На рис. 80 показаны дуанты *A* и *B*, расположенные между полюсами электромагнита. На рис. 81 изображена схема (вертикальная проекция) подвода тока высокого напряжения к дуантам *A* и *B*; мы видим также имеющую сильный отрицательный заряд отклоняющую пластину, с помощью которой пучок ионов выводится из аппарата сквозь тонкое слюдяное окошко. Рис. 79, 80 и 81 взяты из книги Дж. Бартона Хоуга «Электрон и ядерная физика»*.

Основной частью циклотрона является огромный электромагнит, в узком пространстве между расположенными горизонтально один над другим дискообразными полюсами которого находится вакуумная камера. Почти в самом центре этой камеры генерируются требуемые положительно заряженные ионы. Если бы на ионы воздействовал только электромагнит, то они просто вращались

* Berton Hoag J. Electron and Nuclear Physics. Chapman and Hall, Limited. 1938.

бы по малой орбите в горизонтальной плоскости. Однако, сделав пол-оборота, они проходят между проводниками, обладающими большим зарядом и соединенными с противоположными полюсами генератора переменного высокочастотного тока, которые ускоряют ионы (причем всегда в одном и том же направлении), заставляя их двигаться по расширяющейся спирали от центра к периферии со всевозрастающей скоростью. Это достигается синхронизацией частоты переменного тока таким образом, чтобы при каждом прохождении ионами половины пути полярность в пространстве между дуантами изменялась, что вполне осуществимо на практике благодаря постоянному времени вращения ионов (если не брать в расчет относительности этого процесса). При движении ионов по расширяющейся спирали увеличение их скорости полностью компенсируется с увеличением проходимого ими пути. Достигая периферии, ионы электростатически отклоняются и сквозь тончайшее окошко вылетают из аппарата. Дейтоны энергией 16 Мэв достигают скорости 25 000 миль в секунду (примерно 1/7 скорости света) и в виде светящегося луча проходят в воздухе расстояние 1,5 м. Как уже говорилось, для ионов гелия, или α -частиц, эта энергия вдвое больше.

Таким образом удалось искусственно достичь новых уровней энергии, которые настолько превосходят возможности природных радиоэлементов, что последние теперь кажутся относительно слабыми. Как следствие этого, протоны, нейтроны, дейтоны и α -частицы значительно более высоких энергий стали в последнее время доступными для научных исследований в гораздо больших количествах, чем ранее.

На рис. 82 и 83 изображен 220-г циклотрон университета Беркли в Калифорнии с полюсами диаметром 1,5 м (на рис. 82 — та сторона аппарата, откуда выходит пучок). Физик, регулирующий на рис. 82 приборы управления, — д-р Н. Джон Уолк из Ливерпульского университета. Он был убит электрическим разрядом во время работы с аппаратом 21 декабря 1939 г. в возрасте 28 лет. С левой стороны на платформе — алюминиевый приемник пучка. На рис. 83 изображена сторона аппарата, куда пучок поступает по двум сходящимся трубам. Выступающая часть в левой стороне снимка — щит, предохраняющий исследователей от поступающего на отклоняющую пластину тока высокого напряжения. В углу, расположенном по диагонали к тому месту, где стоял д-р Уолк (см. рис. 82), мы видим профессора Принстонского университета Мильтона Уайта. На рис. 84 показан пучок дейтонов энергией 16 Мэв и скоростью 25 000 миль в секунду, который после выхода из аппарата преодолевает в воздухе расстояние около 1,5 м. Фотографии, с которых воспроизведены рис. 82—84, были сделаны и предоставлены в распоряжение автора д-ром Дональдом Кукси, заместителем директора Радиационной лаборатории им. Вильяма Г. Крокера.

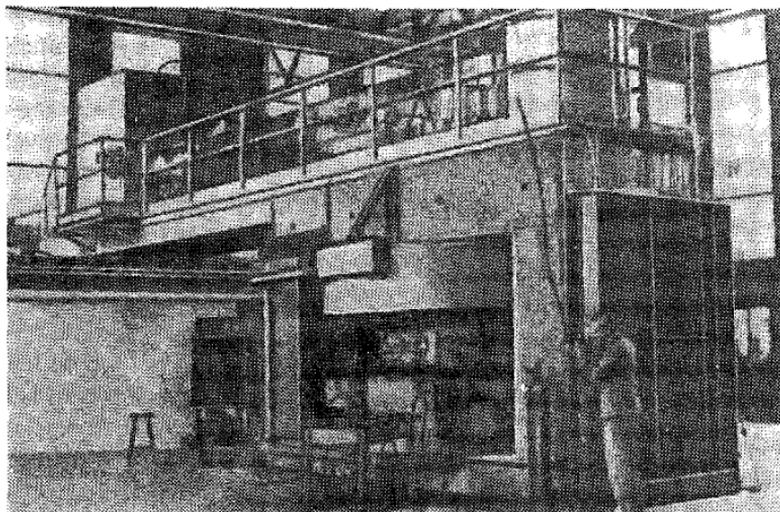


Рис. 82. 220-т циклотрон университета Беркли в Калифорнии, сфотографированный со стороны выхода пучка

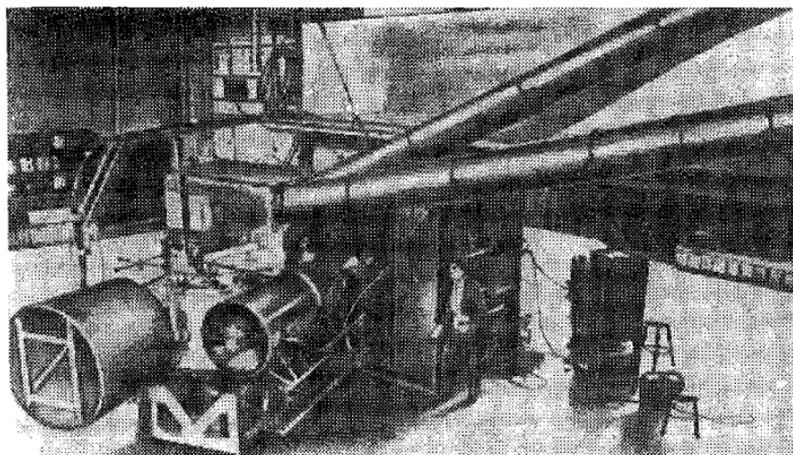


Рис. 83. 220-т циклотрон университета Беркли, сфотографированный со стороны входа пучка

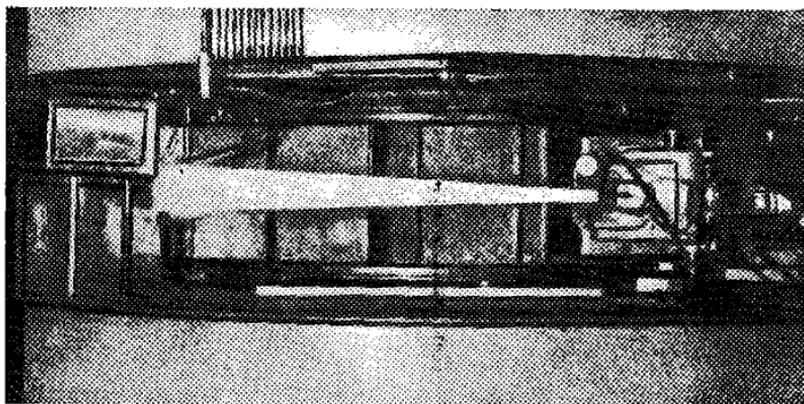


Рис. 84. Пучок энергией 16 Мэв, преодолевающий после выхода из циклотрона расстояние $\sim 1,5$ м

Для тех, кто был свидетелем развития данного предмета, рис. 84 является живым олицетворением прогресса XX в., достигнутого в познании излучений, и его можно сравнить с рис. 41 и 42, иллюстрирующими проникающую способность естественных α -частиц. Тогда, в начале века, казалось поразительным, что атомы гелия могут, практически не отклоняясь, преодолеть в воздухе расстояние в несколько сантиметров при атмосферном давлении или пройти сквозь стекло толщиной в десятитысячные доли сантиметра. А на рис. 84 мы видим пучок атомов вещества, искусственно ускоренных при помощи напряжения в несколько миллионов вольт. Они пробегают в воздухе уже более метра. За ними можно наблюдать благодаря испускаемому ими характерному свечению, присущему, как считалось ранее, только разряду в трубке Гейслера в сильно разреженной газовой среде. Несколько позднее с помощью аппарата, похожего на циклотрон, аналогичное изменение масштаба исследований произошло и в отношении проникающей способности β -частиц (или испускаемых электронов). Этот аппарат известен как *бетатрон*. Однако о нем мы не имеем возможности рассказать более подробно.

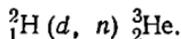
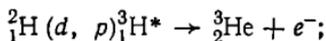
Преобразования, осуществленные на циклотроне

При столкновении двух дейтронов (как, например, при бомбардировке дейтонами мишени из тяжелого водорода) даже напряжения 20 кВ достаточно для того, чтобы высвободилось огромное

количество протонов с длинной пробега 14 см; при этом образуется новое ядро — тритий, являющийся изотопом водорода с массой 3. В свое время этот изотоп пытались найти в тяжелой воде, но, несмотря на большие затраты, поиск тогда закончился безрезультатно. Электролизу было подвергнуто 13 т воды; было получено 43,3 кг тяжелой воды 99%-ной чистоты, однако трития в ней не оказалось. В наши дни известно, что тритий (${}^3_1\text{H}$) радиоактивен. Период его полураспада равен 30 годам; он испускает β -частицы слабой проникающей способности и переходит в изотоп гелия ${}^3_2\text{He}$.

Если процесс столкновения дейтронов происходит при напряжении 100 кв, параллельно с уже описанной идет еще одна реакция: вместе с изотопами гелия с массой 3 появляется большое количество нейтронов. При энергии дейтронов 1 Мэв на каждые несколько тысяч дейтронов появляется один нейтрон. Это обстоятельство, а также отсутствие γ -излучения делает дейтроны более предпочтительным и гораздо более эффективным источником получения нейтронов, чем радий. Существование изотопа гелия с массой 3 в бесконечно малых количествах (0,0000001 в обычном атмосферном гелии и в 12 раз меньше — в гелии, содержащемся в природном газе) было недавно установлено с помощью циклотрона; это содержание настолько мало, что недостаточно для чувствительности даже наиболее совершенного масс-спектрографа.

Рассмотренные ядерные реакции можно записать в следующем виде:



Наиболее удобным лабораторным источником получения нейтронов является закупоренная трубка, содержащая смесь 100 мг чистого сульфата радия с порошком бериллия; колбу можно также заполнить эквивалентным количеством радона. Это позволяет на 1 г радия получать в секунду 20 млн. нейтронов энергией 10 Мэв, и, таким образом, на генерирование одного нейтрона уходит 8000 α -частиц, что является относительно большой мощностью. Более эффективным методом получения нейтронов является бомбардировка бериллия дейтронами энергией 0,9 Мэв, которые превращают его в стабильный изотоп бора с массовым числом, равным 10; в ходе реакции вылетают нейтроны с энергией 9 Мэв; ${}^9_4\text{Be} (d, n) {}^{10}_5\text{B}$.

Одним из достижений в применении циклотрона является то, что с его помощью путем бомбардировки обычной поваренной соли NaCl дейтронами большой энергии был получен соперник радия — радиоактивный натрий с периодом полураспада 15,5 ч.

Он испускает относительно слабые β -частицы, которые тем не менее сопровождаются очень мощным γ -излучением (5,5 Мэв), что значительно превышает энергию γ -излучения радия. Однако радиоактивный натрий легче получить, если использовать циклотрон для производства нейтронов, которые, соединяясь с обычным натрием (${}_{11}^{23}\text{Na}$), и образуют этот изотоп, на одну единицу массы более тяжелый (${}_{11}^{24}\text{Na}$). Так были изготовлены препараты с активностью, эквивалентной 30 г радия.

Искусственное получение радиоэлементов

Величайшим триумфом циклотрона является, по-видимому, получение с его помощью радиоактивных изотопов RaE и RaF, причем второй из них аналогичен открытому М. Кюри полонию, а первый является его непосредственным предшественником в радиоактивном ряду. Закон радиоактивных смещений показал, что RaE представляет собой изотоп висмута с массовым числом 210 (вместо 209 у обычного, неактивного висмута), из которого при испускании β -частицы с периодом полураспада 5 дней получается полоний, занимающий ранее пустовавшее место в подгруппе серы (сразу вслед за висмутом). Затем, по прошествии 140 дней, полоний, испуская α -частицы, превращается в конечный стабильный изотоп свинца с массовым числом 206. Все эти существующие в природе радиоэлементы были воссозданы искусственно, бомбардировкой висмута дейтонами с энергией 5 Мэв; в этом процессе нейтрон из дейтона соединяется с висмутом, образуя RaE, а протон выталкивается. В случае дейтонов большей энергии кроме этой реакции протон соединяется с висмутом, непосредственно образуя полоний, а испускается уже нейтрон. Все эти искусственные радиоактивные изотопы проявляют свойства, идентичные давно известным свойствам природных изотопов, и они свидетельствуют о том, что загадка радиоактивности была разгадана правильно и точно.

Нейтрон в роли агента превращений

В заключение всего сказанного выше о нейтронах необходимо отметить их наиболее важное свойство, впервые замеченное Ферми, а именно их способность играть двоякую роль. При генерировании нейтроны обычно имеют такую же кинетическую энергию, как и другие бомбардирующие частицы, и при столкновении с ядрами вещества они расщепляют последние примерно таким же образом. Однако нейтроны, выражаясь современным языком, чувствительны к водороду (что было установлено супругами Жолио

еще до того, как этот факт получил общее признание). Так как масса нейтрона идентична массе атома водорода, нейтроны при столкновении с водородом теряют скорость намного быстрее, чем при столкновении с каким-либо другим атомом. Если окружить источник нейтронов парафином или водой, их энергия вскоре сократится до уровня энергии простых молекул газа при комнатной температуре (т. е. до 0,04 эв), а при дальнейшем понижении температуры станет еще меньше; таким же образом получают так называемые тепловые нейтроны, проявляющие уникальное свойство: они свободно соединяются даже с наиболее тяжелыми и обладающими самым большим зарядом ядрами, сквозь которые практически не может пройти положительно заряженная частица, какой бы энергией она ни обладала.

В результате ряда опытов Ферми удалось показать, что 47 из 68 элементов с различной атомной массой, которые он подверг воздействию медленных нейтронов, стали радиоактивными, испускающими β -частицы, что позволяет нам считать медленные нейтроны почти универсальным агентом для превращения элементов. Часто наблюдается необычайно высокий уровень поглощения тепловых нейтронов, что особенно заметно при реакциях с бором, кадмием, серебром и гадолинием (один из редкоземельных элементов), которые поэтому используются как щиты, пропускающие быстрые нейтроны, но являющиеся непреодолимой преградой для тепловых. Кроме того, наведенная ими в этих элементах радиоактивность используется для обнаружения и измерения нейтронов. Некоторые из указанных выше элементов выборочно поглощают тепловые нейтроны, «температура» которых находится в определенных пределах. Так, у кадмия необычно сильное поглощение начинается лишь тогда, когда энергия нейтронов снижается до уровня, в 25 раз уступающего уровню начальной энергии нейтронов, — наивысшая точка поглощения достигается при температуре, в 3—4 раза более высокой. Учет всех этих фактов дал возможность регулировать и контролировать процесс искусственного высвобождения атомной энергии.

Глава одиннадцатая. НА ПУТИ К ДЕЛЕНИЮ АТОМА

Всевозрастающая сложность

С древних времен философский подход к изучению природы вещества состоял в упрощении, т. е. в выявлении его основных составных частей. Однако пополнение реальных знаний, в отличие от

поверхностных спекуляций претенциозной монистической натурфилософии, всегда следовало совершенно обратной тенденции. Древним было известно примерно о дюжине элементов. В конце XVIII и в течение XIX в. в число элементов постоянно росло. После появления атомной теории Дальтона и открытия периодического закона оно превысило сначала шесть, а затем семь десятков. В 1913 г. благодаря работам Мозли было показано, что возможно существование только 92 элементов; между тем, начиная с 1905 г., это число, с учетом существующих изотопов, возросло чрезвычайно сильно. Действительно, 92 места периодической системы просто указывают на количество возможных «экстерьеров» атома, а вообще-то в каждой клетке может находиться несколько разновидностей, отличающихся друг от друга массой ядра. Кроме того, атомов прибавилось, по крайней мере, вдвое вследствие разработки методов получения искусственной радиоактивности, ибо ядра в нестабильном состоянии отличаются друг от друга, обладая каждое характерным для него средним временем жизни.

Таким образом, то, что до сих пор считалось элементом, оказалось просто смесью химически идентичных субстанций, массы атомов которых изменяются не непрерывно, а дискретно, на целые единицы. Строго говоря, этот новый взгляд на вещи был бы немыслим до обнаружения радиоактивных превращений. Правда, еще в 1886 г. в Бирмингеме сэр Вильям Крукс в своей президентской речи перед химической секцией Британской ассоциации впервые упомянул о возможности существования, как он назвал их тогда, метаэлементов, и некоторые выдержки из той речи, будучи выделенными из контекста, вполне могли бы цитироваться в качестве предвосхищений учения об изотопах.

Несомненно, он предвидел, что атомная масса может быть средней для некоторой совокупности атомов, различающихся по массе, однако (и это было естественно для того времени) он постулировал непрерывное, а не ступенчатое изменение атомной массы, а главное, что разница в ней должна проявляться в слабых различиях химических свойств, которые в будущем могли бы позволить разделять атомы разной массы фракционированием примерно так же, как начали разделять в то время редкоземельные элементы. То, что простая смесь разных по массе атомов, вполне доступных разделению физическими методами (например, диффузией в газообразном состоянии), абсолютно не поддается даже самому тонкому химическому анализу, в конечном счете позволившему разделить 14 редкоземельных элементов, было для химии совершенно ново и весьма странно. Каждый следующий шаг в изучении вещества вскрывал всевозрастающую его сложность, поэтому не будет преувеличением сказать, что вплоть до 1932 г. об изначальной цели исследования почти полностью забыли. Казалось, что простоты вообще нет в физическом мире, и, чем дальше углубляешься в него, тем сложнее он становится.

Появление простоты

Тем не менее открытие изотопов наряду с формулировкой Эйнштейном принципа эквивалентности массы и энергии, а также экспериментальной проверкой этой эквивалентности, которой мы обязаны гению Астона, положили неожиданно конец такого рода продвижению в обратном направлении. Открытие нейтрона и позитрона в 1932 г., принимая во внимание открытый еще в 1897 г. Томсоном электрон, выявило три элементарные частицы (одну для вещества и две для электричества противоположных знаков), из которых можно было наконец соорудить каркас реального физического мира. На месте устрашающей сложности внезапно возникла замечательная по своей достоверности простота, а ядра, эта святая святых, казавшиеся непостижимой тайной, можно было представить теперь не в виде жидких капель, а состоящими из некоторого количества нейтронов, по большей своей части свободных и в несколько меньшем числе соединенных с позитронами (при этом образуются протоны). Динамика поведения этих ядер под воздействием внешней бомбардировки находила себе аналогию в детской игре мраморными шариками, когда один шарик направляется в сомкнутый ряд других, вызывая движение с такой же скоростью шарика, находящегося в другом конце ряда.

Соотношение чисел нейтронов и протонов

Наибольшее целое число, ближайшее к атомной массе, или массовое число изотопа, обозначим M , тогда $M=N+Z$, где N и Z — соответственно, количества нейтронов и протонов. Назовем Z атомным номером, тогда $N=M-Z$. Далее, оказывается, что отношение числа нейтронов к числу протонов N/Z определяет природу ядра и позволяет систематизировать почти все, что известно о ядре к настоящему времени. Для стабильных элементов, за исключением водорода, ядро которого состоит только из протона, нейтронов в ядре никогда не бывает меньше протонов, обычно же их несколько больше. В ядрах всех элементов, начиная с конца первых двух коротких периодов периодической системы, содержащих по восемь элементов, а именно со второго изотопа хлора ${}_{17}^{37}\text{Cl}$, число нейтронов больше чем на два превышает число протонов, и по мере увеличения атомного номера это превышение постоянно растет. То, что изменения возникают именно тогда, когда элементов в ядре становится 18 вместо 8, наводит на мысль о взаимосвязи условий стабильности внутри и вне ядра. В случае последнего полностью стабильного изотопа — висмута ($M=209$, $Z=83$) отношение N/Z почти точно равно 1,5, а для самого тяжелого элемента — урана ($M=238$, $Z=92$) оно составляет примерно 1,6.

Область стабильности ядер

Благодаря масс-спектрографу мы имеем теперь полное представление об изотопном составе любого элемента, и есть все основания предполагать, что имеющиеся в природе изотопы представляют возможный интервал стабильности для каждого значения Z . Одним из оснований является то, что нейтроны не могут долго существовать в свободном состоянии; что же касается незначительного количества тяжелых изотопов большинства элементов с четным Z , то их наличие, вероятно, указывает на малый естественный поток свободных нейтронов, связанный, возможно, с космическим излучением. Эти нейтроны на протяжении веков способствовали образованию тяжелых изотопов из более распространенных. Легко заметить, что элементы с нечетным Z менее стабильны, чем остальные. Хотя четные и нечетные целые числа, естественно, равноправны, нечетные элементы составляют только одну восьмую массы земной коры. За исключением водорода, натрия, алюминия и фосфора, все остальные нечетные элементы имеются в природе лишь в относительно ничтожном количестве. Половина их представлена одной разновидностью атомов, а другая половина — парами изотопов с соседними нечетными массовыми числами. И только в начале периодической системы два массовых числа иногда оказываются непосредственными соседями, т. е. одно четное, а другое нечетное.

Таким образом, можно довольно успешно предсказать заранее, что произойдет с ядром после тех или иных превращений, в зависимости от того, окажется оно или нет в области стабильности своего номера Z , и если не окажется, то какой тип последующих радиоактивных превращений снова вернет его в устойчивое состояние. А именно: если при добавке нейтрона либо потере протона, позитрона или α -частицы отношение N/Z возросло, то в результате последующего превращения (потери нейтрона или электрона) оно вновь уменьшится, и наоборот. Если с этой точки зрения взглянуть на пять случаев, приведенных в предыдущей главе в качестве первых обнаруженных явлений искусственной радиоактивности, то можно заметить, что это простое правило действительно выполняется. В наиболее распространенном и простейшем случае слияния ядра с нейтроном правило говорит о том, что если новое ядро попадает в область стабильности известных изотопов, то оно не радиоактивно, если же не попадает, то оно испускает β -частицы.

Уже упоминавшееся важное эмпирическое обобщение, известное как правило Маттауха, утверждает, что, за малым исключением, не существует изобаров, элементов с соседними атомными номерами. Изобары часто имеются среди изотопов элементов с ближайшими четными атомными номерами, т. е. у таких пар часто встречаются изотопы с одинаковыми массовыми числами. Зато расположенному между ними элементу с нечетным атомным но-

мером запрещено иметь стабильный изотоп с таким же массовым числом. Вот почему теперь считают, что элементы, отвечающие трем свободным до сих пор клеткам периодической системы (№ 61, 85, 87), не могут существовать в природе в стабильном состоянии.

Ядерная химия

Как пары нейтронов, так и пары протонов склонны к стабильности, тогда как единичные протоны или нейтроны неустойчивы. Все изотопы с четными Z и M можно представить состоящими из ядер гелия плюс или минус дополнительные нейтронные пары, причем такие изотопы относятся к самому распространенному типу, не говоря уже, разумеется, о первых десяти элементах с четными Z . Ядерная химия достаточно сильно отличается от обычной химии, поскольку почти целиком связана с учетом энергетических соотношений. Если есть какое-то превращение с выделением энергии, то оно обладает определенной вероятностью. Обобщая эти особенности, можно заключить, что ядра не имеют, подобно химическим молекулам, статичной структуры архитектурного типа, а представляют собой очень тесные скопления свободных и независимых частиц, протонов и нейтронов, и, возможно, включают гелиевые ядра, образованные парами протонов и нейтронов. В этом есть какое-то сходство с жидкой каплей, — тогда излучение ядром частицы подобно испарению. Мы, конечно, ни в коем случае не считаем, что столь простые модели описывают весь круг известных явлений, однако иногда они оказываются крайне полезными как в теории, так и на практике. Показать, что действительно, есть вещи, которые уж во всяком случае не снились нашим философам, это значит именно теперь дать некоторое представление о космическом излучении, с которым связаны явления, простирающиеся далеко за пределы круга уже известных земных явлений внутри атома.

Космическое излучение

В 1910 г. Гоккель, поднявшись с электроскопом на воздушном шаре на высоту 5 км, обнаружил, что слабая ионизация атмосферы, которая ранее, естественно, приписывалась радиоактивным элементам земной коры и утечке в атмосферу радона, постоянно росла с высотой. Между тем, имея земное происхождение, она должна была уменьшаться и на большой высоте стать очень малой или исчезнуть вовсе! В сходном эксперименте Гесс и Колхёрстер достигли высоты 11 км и обнаружили, что ионизация там примерно в восемь раз больше, чем над уровнем моря. В 1912 г.

было установлено, что из окружающего пространства на Землю по всем направлениям идет поток излучения гораздо большей проникающей способности, чем γ -излучение. Он практически одинаков днем и ночью, не изменяется при солнечном затмении, и его истинный источник остается загадкой.

После войны 1914—1918 г. благодаря применению специальных больших электроскопов высокой чувствительности исследования стали проводить и на земной поверхности. Милликен поднимал электроскопы высоко в Скалистые горы и Анды и погружал их на большую глубину в лишенные радиоактивных загрязнений ледниковые озера; это делалось для того, чтобы определить проникающую способность нового излучения. То же самое Регенер делал на озере, расположенном почти на 4,5 км выше уровня моря. Принимая во внимание, что γ -излучение при всей его проникающей способности одинаково поглощается прозрачными и непрозрачными материалами и поглощение приблизительно пропорционально плотности вещества, можно сказать, что в смысле проникающей способности слой воздуха, покрывающий земную поверхность, эквивалентен почти метровому слою ртути, через который (даже если бы Солнце состояло из чистого радия) проникает так мало γ -квантов, что их просто нельзя было бы зарегистрировать. Из полученных данных следовало, что даже самые мягкие компоненты достигающего земной поверхности космического излучения обладают в пять или десять раз большей проникающей способностью, чем γ -кванты. Однако на какую бы глубину ни погружали детекторы, излучение хотя постепенно и ослабевало, но никогда не поглощалось полностью. Аналогичные эксперименты, проведенные на рудниках Германии и Швеции, показали, что даже сквозь толстый слой земной коры все еще проникала некоторая часть излучения. Здесь следует вспомнить, что поначалу нейтроны были приняты за γ -излучение очень большой проникающей способности, поэтому что-то похожее могло иметь место и в космическом излучении.

На следующем этапе исследований стали использовать метеорологические шары-зонды, на которых устанавливали приборы, автоматически регистрирующие изменение ионизации атмосферы с высотой. На заданной высоте эти шары разрывались, а приборы с парашютом целыми и невредимыми спускались на Землю. Так была достигнута высота примерно 16 км, выше которой оставалась только одна десятая всей атмосферы. При этом обнаружили, что ионизация достигала максимума как раз чуть ниже слоя, где она превышала ионизацию на уровне моря более чем в 100 раз, а затем она снова начинала уменьшаться. Если это так, то пришедшее из мирового пространства первичное излучение само не ионизует, а производит ионизацию только после прохождения через черные слои атмосферы, где превращается в более мягкое вторичное излучение. Но, что еще важнее, из этого следует, что излучение, достигшее Земли, не пересекает ничего, кроме пустого пространства.

Эти эксперименты обнаружили также новое явление, известное как *ливни* или *вспышки космического излучения*. Это явление, видимо, обусловлено случайными взрывными выбросами энергии, производимыми отдельными излучающими частицами. С момента открытия этого явления его интенсивно изучают на поверхности Земли с помощью камеры Вильсона, однако его истинная природа остается одной из главных нерешенных проблем космической физики. Изучение индивидуального излучения по трекам Вильсона и с помощью счетчика Гейгера почти полностью заменило ранее применявшиеся методы, причем новые экспериментальные результаты несли несколько другую информацию, так как речь теперь шла об отдельных частицах, а не о суммарных усредненных эффектах излучения.

Полученные К. Андерсоном с помощью камеры Вильсона фотографии четырех типов треков приведены на рис. 85—88. Для получения стереоскопического эффекта фотографии сделаны в двух видах: левый — прямой фотоснимок, правый — его зеркальное отображение. Съемка проводилась на пике Пайка в Колорадо (высота 5 км). Ось цилиндрической камеры была горизонтальной, для разделения частиц использовалось магнитное поле 8000 *гс*, направленное внутрь листа. На рис. 85 показан ливень, из трех электронов и трех позитронов, оцененные энергии которых равны соответственно: 3, 5, 55 и 190 и 78, 70 и 90 *Мэв*. На рис. 86 изображен трек сильно ионизирующей частицы (по-видимому, протона) с энергией 150 *Мэв*, движущейся со скоростью, равной половине световой; частица образовалась, вероятно, в электронном ливне, который тоже виден на снимке. На рис. 87 и 88 камера была разделена пополам в горизонтальной плоскости свинцовой пластиной толщиной 3,5 мм. На рис. 87 видна вспышка, вызываемая более чем 100 электронами, суммарная энергия которых по оценкам превышает 10 000 *Мэв*; природа такой вспышки пока еще совершенно непонятна. Изображенное на рис. 88 экспериментатор объясняет следующим образом: позитрон с энергией около 480 *Мэв* сверху ударил в пластину и с нижней ее поверхности вылетели три частицы, одна из которых — первоначальный позитрон с энергией, снизившейся до 31 *Мэв*, а две другие — электрон-позитронная пара (тот и другой с энергией 45 *Мэв*), образовавшаяся из фотона, рожденного в свинце упавшим позитроном. Короткий густой след оставила, видимо, случайная α -частица от радиоактивных загрязнений в свинцовой пластине.

Поскольку некоторая часть излучения представляет собой высокоскоростные заряженные частицы, то, попадая в магнитное поле Земли, они должны концентрироваться вблизи магнитных полюсов. Этот *широтный эффект* после нескольких неудачных попы-



Рис. 85. Ливень из трех электронов и трех позитронов



Рис. 86. Трек протона энергией 150 Мэв

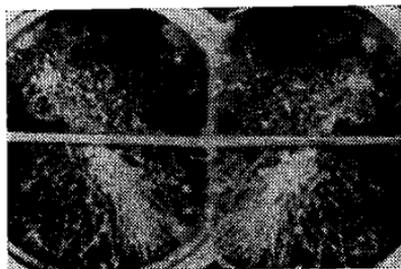


Рис. 87. Электронный взрыв или ливень в космическом излучении суммарной энергии 10 000 Мэв



Рис. 88. Рождение электрон-позитронной пары в результате удара о свинцовую плиту позитрона энергией 480 Мэв

ток был обнаружен Клеем и Комптоном. На уровне моря он примерно на одну седьмую больше для умеренных широт, чем для тропиков, а на высоте 4,5 км он больше приблизительно на одну треть.

Имеет место также малый эффект восток-запад, состоящий в том, что в восточном направлении отклоняется больше частиц, чем в западном; это значит, что в космическом излучении больше положительных частиц, чем отрицательных. Заметим, что суточные колебания интенсивности излучения ничтожны. Это указывало на расположение источника излучения за пределами Солнечной системы, в самых отдаленных глубинах Вселенной.

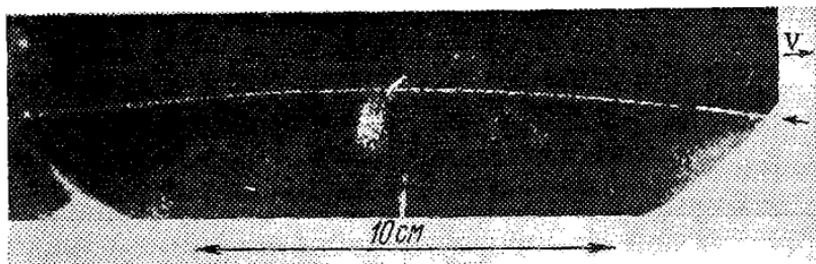


Рис. 89. Трек мезона в камере Вильсона

Мезон

Самым последним вкладом в фундаментальное знание стало открытие вероятного существования новой элементарной частицы, названной *мезоном*. Первоначально существование этой частицы постулировал теоретик Юкава для того, чтобы объяснить свойства ядра. Ее масса занимает промежуточное положение между массами электрона и протона. Предполагается, что она живет только около одной миллионной доли секунды, превращаясь затем в электрон и другую теоретически постулированную частицу, которую назвали *нейтрино*. Не исключено, однако, что последнюю вообще нельзя зарегистрировать, поскольку ее предположительная масса равна лишь массе электрона, а заряд равен нулю. Космический мезон заряжен отрицательно и по массе примерно в 150 раз превосходит электрон. Насколько известно, он достаточно точно совпадает с теоретической частицей Юкавы, которая может быть как положительной, так и отрицательной. На рис. 89 и 90 приведены фотографии, сделанные с помощью камеры Вильсона Вильямсом и Пикапом из Ливерпульского университета. Трек на рис. 89 был получен в большой камере Вильсона, 30 см в диаметре и 30 см высотой, в магнитном поле 1000 гс. Считают, что это мезон, поскольку если бы это был электрон, движущийся по той же траектории, то плотность ионизации вдоль нее должна была быть в три раза меньше, а если протон, то в сто раз больше. Чтобы наглядно показать это, на рис. 90 трек космического электрона с той же кривизной траектории наложен на предыдущую фотографию ниже участка трека предполагаемого мезона.

Современное состояние предмета порождает много вопросов, не имеющих пока ответа. Тот факт, что космическое излучение приходит неизменным, без образовавшегося после прохождения через вещество вторичного излучения, если считать его доказанным, абсолютно исключает какой-либо другой источник, кроме, в сущности, пустого пространства, так что излучение не может происхо-

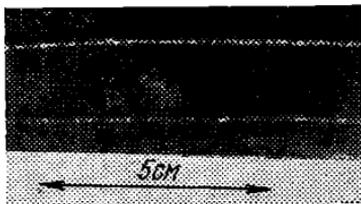


Рис. 90. Трек мезона (вверху) в сопоставлении с треком электрона космического излучения

концентрации формируются какие-то образования, которые с течением времени концентрируются в отдельный атом, хотя надо признаться, что по современным понятиям такое событие маловероятно, если вообще вероятно. До сих пор не объяснен тот факт, что в пустом пространстве, очевидно, протекают энергетические процессы, в которых выделяется больше энергии, чем это должно быть по нашим сегодняшним представлениям.

Вся энергия достигающего Земли космического излучения составляет по оценкам не меньше одной десятой энергии, приносимой на Землю светом звезд; ее достаточно, чтобы поддерживать температуру черного тела, помещенного в космосе, на 3°C выше абсолютного нуля. Ливни указывают на существование уровней энергии, происхождение которых в настоящее время необъяснимо, поскольку даже энергии, выделяемой при полной аннигиляции самых тяжелых из известных нам атомов, едва бы хватило, чтобы объяснить существование некоторых из них. Здесь мы сталкиваемся с неразрешимыми противоречиями, которые вообще характерны для многих направлений современной космологической теории.

Ядерное деление радиоэлементов

Теперь мы добрались до последнего звена цепи лабораторных открытий, которым в свое время стало искусственное высвобождение существенной части полной энергии атома, а именно до деления атома. Ферми обнаружил, что в результате нейтронной бомбардировки природных радиоактивных элементов, урана и тория, получалась очень сложная смесь радиоактивных продуктов, которые испытывали длинные серии последовательных β -распадов, обычных по типу для естественной радиоактивности, но едва ли до сих пор встреченных в радиоактивности искусственной. Разумеется, он интерпретировал полученные результаты, руководству-

ьясь установленным ранее простым правилом, описывающим такого рода превращения; оно указывало на существование целого ряда новых элементов, расположенных в периодической системе за последним из известных элементов — ураном. Ферми назвал их *трансурановыми элементами*. В том, что он выводил это единственно из закона радиоактивных смещений, Ферми был одновременно неправ и прав: неправ потому, что принимал образовавшиеся из урана в результате последовательных β -превращений продукты за новые элементы; прав в том, что, как показали более поздние работы, трансурановые элементы действительно могут быть получены. Более того, фактически именно второе из этих двух следствий начинает занимать теперь доминирующее положение.

Однако между ураном и торием обнаружили важные различия. Торий превращался под действием только быстрых нейтронов, и продукты распада идентифицировались как новые изотопы элементов с номерами 88—91, т. е. радия, актиния, тория и протактиния. Главное отличие состояло в том, что уран превращался под действием как быстрых, так и медленных нейтронов, причем действие тех и других было в значительной степени разным. Здесь ряду последовательных продуктов распада первоначально отводились пять новых мест за ураном — с номерами от 93 до 97.

Ключ к достижению истинной природы происходящего с ураном был дан в работе И. Жолио-Кюри и П. Савича, которые установили, что одним из урановых продуктов является редкоземельный элемент, похожий на лантан, № 57, но отличный от актиния, № 89; правда, они не могли утверждать, что это лантан, не сумев доказать, что продукт является изотопом лантана.

Затем Ган обнаружил, что другой продукт, принятый за изотоп радия, № 88, явно отличается от радия, но не отличается от бария, № 56. На этой стадии Ган и его берлинские сотрудники приняли в 1939 г. справедливую и по сей день точку зрения. В согласии с ней уран под действием нейтронов претерпевает совершенно новый тип распада, названный *делением*, при котором два самых тяжелых известных атома (урана и тория) делятся на две более или менее равноценные части.

Огромная важность этого открытия была понята очень скоро. Ибо, как уже отмечалось ранее, согласно простым арифметическим правилам, при делении атома должен получаться значительный избыток нейтронов, двадцать или даже больше; ведь только в таком случае из атома урана, для которого отношение N/Z равно 1,59, образуются два атома элементов середины периодической системы, попадающие в свою область стабильности, т. е. имеющее отношение от 1,2 до 1,4. К тому же так как коэффициент Астона становится равным —10, а для урана он составлял +5,4, то энергия, высвобождающаяся в акте единичного распада, должна быть порядка 165 *Мэв*, т. е. примерно в четыре раза больше, чем в полной последовательности 14 естественных превращений урана.

Продукты деления и их энергия отдачи

Поскольку разгадка была найдена, то вскоре стала понятна и природа изобилия новых продуктов. Было установлено, что в результате деления образуются две группы атомов: в одной основная часть имеет энергию 70 Мэв, в другой — 100 Мэв; массы атомов находятся в обратном соотношении, что продиктовано законом сохранения импульса. Однако деление не является каким-то одним фиксированным видом распада, как в естественной радиоактивности, доказательством чему служит тот факт, что массы двух образующихся частей тем ближе друг к другу, чем выше энергия нейтронов, вызывающих деление. Для более тяжелой группы M лежит в пределах от 154 до 127 и Z — от 51 до 57, а для легкой группы — от 115 до 83 и от 35 до 38 соответственно, хотя среди продуктов распада появляется также и молибден с $Z=42$. Активность урана после облучения так высока, что в сравнении с ней начальную его активность можно считать пренебрежимо малой. Продукты испытывают ряд последовательных радиоактивных превращений, в которых β -излучение сопровождается γ -излучением; время их жизни составляет от долей секунды до нескольких лет, некоторые живут около месяца, причем наиболее представитель-

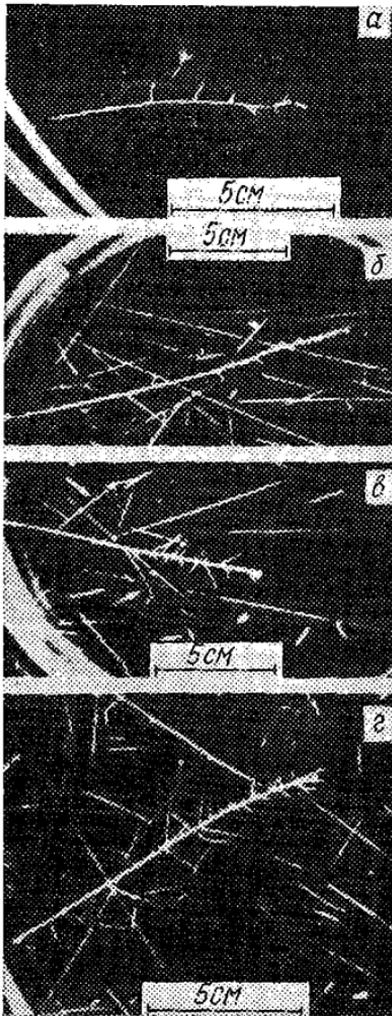


Рис. 91. Отдача продуктов расщепления урана (эффект новогодней елки)

ный тип продуктов дает меньше 10% вклада в полную активность.

Энергетическая отдача образующихся после деления частей очень помогает их идентификации и изучению, как это имеет место с некоторыми из короткоживущих продуктов α -излучения в естественной радиоактивности. Но здесь, согласно закону сохранения импульса, энергия отдачи гораздо выше, так что разлетающиеся части способны ионизовать газы, и, следовательно, можно изучать их треки в камере Вильсона. Эти треки, совсем непохожие на обычные треки α -частиц, демонстрируют то, что было удачно названо *эффектом новогодней влчи*. Энергия продуктов настолько велика, что ядра, поочередно встречающиеся на их пути, в результате переданного им импульса отдачи сами ионизуют газ и образуют короткие треки — ветви вдоль главного пути или ствола. Отдача дает возможность отличить разлетающиеся продукты деления от неизвестных продуктов превращений обычного типа.

На рис. 91 воспроизведены четыре фотографии, сделанные Боггилдом с помощью камеры Вильсона, на которых видны продукты отдачи деления урана. Изображенная на снимке 91, *a* камера была заполнена смесью аргона с парами спирта и воды при давлении 10 см, а на снимках 91, *b* — *г* — влажным гелием при давлении 34 см. Колоссальная энергия разлетающихся фрагментов деления проявляется в большом количестве прямых, или центральных столкновений их с атомными ядрами; при каждом из таких столкновений ядра отлетают со скоростью, достаточной для ионизации газа и образования короткого трека — ветви.

Испускание нейтронов

Что касается испускания свободных нейтронов, то было установлено, что оно возникает без какой-либо, даже ничтожной, временной задержки вслед за столкновением бомбардирующего нейтрона с атомом. Хотя избыток отношения N/Z двух продуктов деления ликвидируется главным образом за счет последовательных β -превращений, атом урана испускает также и некоторое количество нейтронов. Вероятно, число их зависит от энергии бомбардирующих нейтронов, но принято считать, что обычно их бывает три. Сами продукты деления тоже выбрасывают нейтроны. Четыре группы нейтронов, соответствующих продуктам с периодами полураспада 2,5; 7; 24 и 57 сек, испускаются вслед за основным делением, но только около 1% всех нейтронов испускается с задержкой, равной 0,01 сек. Такие вторичные нейтроны, несмотря на их ничтожное, по сравнению с нейтронами, испускаемыми в первый момент, количество, сыграли чрезвычайно важную и полезную роль в контроле и управлении искусственным процессом деления, поскольку именно они позволили сделать его самоподдерживающимся. Средняя энергия основной группы испускаемых нейтронов равна 1 Мэв, и потеря ядрами своего нейтронного излишка считается процессом, очень похожим на испарение капли жидкости.

После того как были установлены эти факты, появилась возможность осуществить такой ход процесса, когда деление урана, однажды начавшись, в соответствующих условиях продолжалось бы спонтанно, без дополнительных внешних стимулов, точно так же как химическое изменение совершается через горение или детонацию. Поскольку при распаде каждого атома урана возникает несколько высокоэнергетических новых нейтронов, они, в свою очередь, вызывают деление соседних атомов урана, так что контролируемый процесс может протекать равномерно, как горение, в противном случае последует страшный взрыв, во много миллионов раз более мощный, чем любой из известных химических взрывов.

Наше поколение стало свидетелем реализации обеих этих возможностей.

Деление урана

Теперь перейдем к более детальному рассмотрению превращений, происходящих с ураном под действием нейтронов, о которых теперь знаем достаточно полно. О сходных превращениях тория, кроме того, что при его распаде тоже образуются продукты деления с Z от 52 до 57, до сих пор известно немного. При избытке продуктов деления лишь очень немногие из них были идентифицированы с радиоактивными изотопами, искусственно полученными обычными методами, к тому же среди этих продуктов могут быть несколько изотопов одного и того же элемента.

Рассмотрим две исключительно важные особенности, которые есть у урана и которых нет у тория.

Первая состоит в том, что имеется сильный так называемый резонансный захват нейтронов основным изотопом урана с массовым числом 238, образующий при нормальном ходе процесса изотоп уран-239. Уран-239 β -активен с периодом полураспада 23 мин, и, следовательно, из него получается элемент № 93 — первый трансурановый элемент, к непосредственному рассмотрению которого мы перейдем позднее. Эта реакция осуществляется, главным образом, под воздействием медленных нейтронов, скорость которых ограничивается вполне определенным пределом, соответствующим энергии примерно 25 эв. Считается, что испускаемые при делении быстрые нейтроны сначала совершают, не вызывая расщепления, множество неупругих столкновений с ядрами урана-238, в результате которых их скорость уменьшается. Вторая, более важная особенность состоит в том, что уран, в отличие от тория, захватывает медленные нейтроны, которые и вызывают его деление.

Исходя из общих теоретических соображений, Бор установил, что делящимся изотопом является не уран-238, присутствующий в естественной изотопной смеси в подавляющем количестве, а другой изотоп урана, с массой 235, который составляет в природном уране только 1/140 часть. Существование этого изотопа, хотя история его продолжается уже целое поколение, фактически только что было доказано.

Уран и торий оказались из числа «крепких орешков» для масс-спектрографического изотопного анализа, однако недавно используя более мощные методы для получения их положительных ионов, эту задачу успешно разрешил Демпстер, установивший для урана уже известный нам результат и нашедший, что торий состоит из единственного изотопа с массой 232. Это единственное исключение для элементов с четным атомным номером, которые всегда имеют сложный изотопный состав. Однако торий $^{232}_{90}\text{Th}$, несмотря на то что он является самым долгоживущим среди известных нестабильных элементов, все-таки не полностью стабилен и всегда встречается в природе вместе с бесконечно малой долей изотопа $^{228}_{90}\text{Th}$ — радиотория, который, строго говоря, сводит на нет даже это единственное исключение.

На рис. 92 показаны масс-спектры урана и тория, полученные Демпстером с помощью его метода *горячей искры*. Двухзарядные ионы тория (верхний спектр) и урана (нижний спектр) сравнивались с однозарядными ионами изотопов олова. Торий был представлен изотопом с массовым числом 232, а уран — с массовым числом 238, но на оригинальной фотографии, репродукцией с которой является рис. 92, в нижнем спектре можно было едва различить слабую линию на 117,5, соответствующую изотопу урана с массой 235, хотя на репродукции этой линии уже не видно.

О. Пикар — широко известный тем, что он первым поднялся в стратосферу на воздушном шаре в герметичной сферической кабине — довольно давно сделал предположение, что изотоп урана, который называли актиноураном, мог бы оказаться родоначальником актиниевого радиоактивного ряда. Альтернативой этой возможности могло быть появление актиниевого ряда в результате вступления ряда урана: либо в начале его, либо после третьего изотопного члена, так называемого урана II, причем лишь несколько процентов атомов должно было распадаться по этой схеме, остальные же давали основной ряд радия. Такое ветвление в самом деле имеет место в конце всех рядов в радиоактивных короткоживущих осадках. Уран II с массовым числом 234 составляет лишь 1/20 000 часть полного количества урана и с трудом детектируется масс-спектрографом. Но гораздо раньше масс-спектрограф показал наличие небольшой, но заметной фракции изотопа

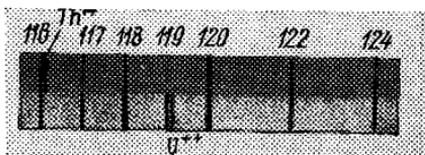


Рис. 92. Спектр масс тория и урана, наложенный на спектр олова

свинца-207 в свинце, извлеченном из урановых минералов. Так как в активном ряду уран семь раз испытывал α -превращение, то масса актиноурана становится $207 + 28 = 235$, что подтверждает, скорее, происхождение актиниевого ряда по Пикару, чем гипотезу ветвления. Уран-235 легче расщепляется медленными тепловыми

нейтронами, чем быстрыми, и, если бы не было этого изотопа, искусственного высвобождения атомной энергии не удалось бы добиться. Следует, однако, помнить, при сколь незначительных запасах и для какой ничтожной доли одного, вовсе не избыточного, элемента оно было пока достигнуто.

Глава двенадцатая. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕВРАЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ

Две цели

С этого момента попытки освобождения атомной энергии из урана сосредоточились на двух направлениях, каждое из которых подразумевало разработку своего технологического процесса. Первое направление с самого начала имело прежде всего военное значение: его целью было использование освобожденной атомной энергии в качестве сверхмощного взрывчатого средства. Второе, направление, более практико-экономического характера, ставило своей задачей достижение непрерывной управляемой ядерной реакции, что обеспечило бы промышленность непревзойденным до того времени источником энергии. Работа началась (и особенно в США) сразу в двух направлениях, а так как скоро обнаружилось, что второй проект может стать наиболее быстрым и эффективным путем к осуществлению первого, то и впоследствии их параллельная разработка продолжалась почти с одинаковой интенсивностью. В конце концов оказалось, что оба полученных технологических процесса почти в равной степени способствовали достижению одной цели — военной.

Военная цель

Необходимым условием достижения поставленной военной цели было разделение двух изотопов урана с массовыми числами 235 и 238, так как ожидалось, что уран, в достаточной степени обо-

гащенный изотоп 235, будет спонтанно взрываться в соответствующих условиях. 6 мая 1940 г., за восемнадцать месяцев до нападения японцев на Пирл-Харбор, обусловившего, как известно, вступление США в войну, в Европу было передано телеграфное сообщение об экспериментальном подтверждении учеными Миннесотского университета предсказания Бора относительно урана-235. Используя метод масс-спектрографии, они частично и, конечно, в ничтожно малом количестве разделили два изотопа, а результаты проведенной ими многократной бомбардировки изотопов нейтронами оказались столь многообещающими, что было сочтено возможным приступить к попыткам промышленного получения урана-235.

Таков был самый первый и самый общий появившийся в научном мире признак, предвещавший, что освобождение атомной энергии в военных целях перестало быть просто химерой. И все же любому ученому, хоть в какой-то степени представлявшему, каких геркулесовых усилий стоит получение урана-235 в широких масштабах, решение этой проблемы еще до конца войны казалось весьма гипотетическим. По мнению автора этих строк, данная проблема и до сегодняшнего дня остается технически нерешенной, если, конечно, иметь в виду практическое использование искусственного превращения для создания экономичного источника энергии и оставить в стороне применение его для получения сверхоружия, при производстве которого любые затраты не только не являются непреодолимым препятствием, но и могут оказаться для определенных промышленных кругов вполне желательными.

Мирная цель

Прежде чем приступить к подробному анализу военного направления изысканий, было бы полезно проследить до определенной стадии развитие мирного, цель которого — получение упорядоченного и управляемого процесса освобождения энергии — не требует для своего осуществления столь затруднительного технически разделения изотопов, хотя, с другой стороны, требует в качестве основной предпосылки сравнительно большого количества урана. Первоначально считалось, что спонтанная цепная реакция деления возможна при простом механическом соединении достаточно большой массы этого элемента. Ф. Перрен, один из молодых членов парижского кружка физиков-теоретиков, сын Жана Перрена, известного своими работами в области броуновского движения, приблизительно оценил такое необходимое количество как изготовленную из окиси урана сферу радиусом 274 см и массой 40 т. Сейчас известно, что из-за потери нейтронов в результате резонансного захвата, дающего, как уже упоминалось, уран-239, сколь бы большое количество урана мы ни применили, его все равно будет недостаточно. Отсюда зерно идеи о создании установки, известной с

тех пор под пнем *уранового реактора*, или буквально «уранового штабеля», — довольно бесцеремонное название для изобретения, которое и по сей день остается наивысшим достижением человеческого разума.

Замедлитель

Чтобы предотвратить нежелательную утечку нейтронов, необходимо было заставить их как можно быстрее покидать излучающий их уран, а также лишать их начальной скорости и кинетической энергии раньше вторичного попадания в уран в качестве тепловых нейтронов и расщепления ими изотопа 235 . Именно для этого и требуется *замедлитель*. Он должен быть одним из наиболее легких элементов, ядро атомов которого было бы ближайшим по массе к нейтрону: при каждом очередном столкновении последний должен лишиться максимально возможной части своей энергии, но одновременно он не должен вызывать превращения. Практически мы имеем только два элемента, способных выполнять функцию замедлителя: дейтерий и углерод. Однако производство тяжелой воды слишком дорогостояще, а время ее получения слишком велико, чтобы оправдывать применение дейтерия в условиях иных, нежели лабораторные. Второй элемент обладает, несмотря на в шесть раз большую массу ядра его атомов, известными преимуществами: он может быть приготовлен в любом количестве в виде искусственного графита, получаемого в электропечах, и относительно чистым по своему составу, так как почти все элементы, кроме углерода, испаряются при температуре каления.

Урановый реактор

Урановый реактор имеет, как правило, структуру трехмерной решетки, состоящей из отдельных небольших топливных элементов из урана, находящихся в матрице замедлителя. Распределение урана в замедлителе тщательно рассчитывают с учетом всех имеющихся данных о свойствах участвующих в реакции нейтронов и ядер, чтобы обеспечить возврат в уран максимального числа испущенных нейтронов после того, как они отдадут часть своей первоначальной энергии. Потери нейтронов на нежелательные превращения должны сводиться, таким образом, к минимально возможному. Что же касается контроля за процессом в случае его возможного самопроизвольного ускорения, то задача состоит, наоборот, в захвате максимума нейтронов до уровня, необходимого для начала процесса. Не представляет трудности внести в реактор большее или меньшее количество такого, например, элемента, как кадмий, упомянутого ранее в качестве сильного поглотителя нейт-

ронов, и регулировать посредством его введения количество свободных нейтронов таким образом, чтобы поддерживать процесс распада урана в реакторе на любом заданном уровне. С этой целью обычно используют стержни из специальной борной стали, которые вводят в реактор или выводят из него по мере необходимости.

Уже упоминалось, что хотя большинство нейтронов, испускаемых в результате деления урана-235, обладают энергией, достаточной для деления урана-238, лишь немногие быстрые нейтроны действительно вызывают деление урана-238. Это объясняется потерей, вызываемой резонансным захватом нейтронов, энергия которых равна промежуточному значению; именно эту потерю и нужно снизить до минимума правильным расчетом решетки. Считается, что в графитовом замедлителе нейтроны пробегают между двумя очередными столкновениями с легкими ядрами атомов углерода расстояние около 2,5 см; при этом они испытывают около 200 таких столкновений, прежде чем снова попадут в уран, чтобы произвести в нем деление изотопа 235.

Согласно данным, опубликованным в официальном американском издании «Atomic Energy» (начиная с памятной даты нападения на Пирл-Харбор 7 декабря 1941 г. этот журнал был практически единственным доступным источником информации общественности об атомных изысканиях), в первый урановый реактор было загружено 6 т металлического урана и некоторое (точно не указанное) количество окиси урана, которая, вероятно, была добавлена из-за недостатка в то время урана в чистом виде. Реактор имел сферическую форму и был составлен из горизонтальных слоев блочного графита, которые располагались между подобными же слоями из перемежающихся блоков графита и урана. Критическое состояние реактора, при котором потеря нейтронов компенсировалась их производством, было достигнуто, когда сфера была построена на три четверти, в результате чего реактор так и не получил окончательной формы правильного шара.

Реактор был построен в помещении зала для игры в мяч под трибунами стадиона на территории Чикагского университета и приведен в действие 12 декабря 1942 г. при расчетной начальной мощности 0,5 Вт. Через 12 дней мощность была доведена до 200 Вт, после чего дальнейшее ее повышение было сочтено рискованным из-за генерируемого установкой опасного излучения, а сам реактор был перемещен за пределы города, в Аргошскую лабораторию. Здесь же для экспериментального изучения нейтронов были воздвигнуты еще два реактора: один (в 1943 г.) практически такой же, как и первый, и отличающийся от него только тем, что его критический размер был рассчитан таким образом, чтобы установка приобрела форму простого куба, и другой (в 1944 г.), в котором в качестве замедлителя использовалась тяжелая вода, что позволило значительно уменьшить размеры реактора по сравнению с

предыдущими. Реакция в последнем реакторе стала самоподдерживающейся на стадии, когда он был заполнен на $\frac{3}{5}$ предназначенным для него замедлителем; из реактора пришлось удалить некоторое количество урана, а также снабдить его дополнительными контрольными стержнями. К этому времени в США и Канаде было налажено производство тяжелой воды: в США из обычной воды простым, но дорогостоящим способом ее фракционной дистилляции, а в Канаде — при помощи физико-химического каталитического процесса обмена между электролитическим водородом и дейтерием в воде — методом, доказавшим свою экономичность.

Установки в Клинтоне и Ханфорде

Ни один из упомянутых выше реакторов не был снабжен системой охлаждения, вследствие чего их мощность была ограничена скоростью естественного рассеяния генерируемого ими тепла. Первый реактор проработал без перерыва и без осложнений в течение двух лет при мощности в несколько киловатт; несколько раз на короткие промежутки времени его запускали на гораздо большую мощность. На основании опыта строительства и работы этих экспериментальных установок были возведены так называемые *промышленные реакторы*: первый, пробный, в Клинтоне, шт. Теннесси, и через некоторое время — еще несколько в Ханфорде на западном берегу реки Колумбия, к северу от Паско и почти в самом центре шт. Вашингтон. Здесь было спроектировано строительство пяти реакторов, отдаленных для безопасности на расстояние около десяти километров друг от друга. Три установки были закончены к лету 1945 г., причем одна из них уже проработала в течение почти одного года. Реакторы были снабжены системами водяного и воздушного охлаждения, что потребовало при их возведении большого количества материалов, и были рассчитаны на работу при мощности порядка несколько тысяч киловатт. За исключением первой установки в Клинтоне, которая в 1944 г. работала на мощности, превышающей 1800 кВт, данные о рабочих характеристиках других реакторов почти не публиковались. В Ханфорде на площади 2600 км² фундамент первого цеха был заложен в апреле 1943 г. Уже в 1944 г. на месте голых холмов и заросших кустарником равнин, где прежде были лишь две деревни и несколько заброшенных ферм, вырос город с населением 60 000. Сейчас он покинут, а персонал, обслуживающий установки, переехал в одну из двух деревень.

Величайшее достижение в истории человечества

Военные изыскания, обусловившие столь знаменательный и столь злосчастно быстрый прогресс от стадии в полватга до мощи, соперничающей с производительностью крупнейших гидроэлектро-

станций, имели своей целью отнюдь не получение энергии: последняя лишь растрачивалась впустую, согревая воды реки Колумбия. Однако, прежде чем перейти к изложению действительной цели изысканий, мы сочли нужным остановиться, как это уже было сделано, на разработке уранового реактора как изобретения, чрезвычайно интересного самого по себе и имеющего огромную важность. Несомненно, урановый реактор олицетворяет собой самое гениальное и замечательное достижение разума за всю историю человечества. К концу 1942 г. весь хитроумный арсенал высоковольтных установок, соперничающих по мощи с молниями, изумительно точных масс-спектрографов, циклотронов массой в тысячи тонн и стоимостью несколько сотен тысяч фунтов стерлингов, все невероятно чувствительные приборы, подсчитывающие и фотографирующие траектории отдельных атомов (именно при их помощи поиск, начатый Резерфордом в 1911 г. открытием ядра атома, продолжался затем во многих странах мира) — все это исчезло, как дым с выстроенного здания. Вместо них обнажилась правильная формы установка массой в несколько тонн, состоящая из механически соприкасающихся элементов с самыми тяжелыми и самыми легкими из известных атомов. И вот посмотрите! По мере того как «груда» растет, она сама собой начинает генерировать энергию, мощь которой в миллионы раз превосходит все наивысшие достижения прошлого века. Выйди она из повиновения, вспыхнуло бы на Земле сияние, сравнимое лишь с ослепительностью Солнца и звезд.

Страшно подумать, в какие неподготовленные руки наука столь преждевременно вложила силы, многим более четырех лет назад казавшиеся бесконечно недоступными.

«Томная» и «атомная» энергия

После того как атомная энергия искусственно и количественно освобождена, по-прежнему называть ее «атомной» было бы противоречием в терминах. Выражение «атомная энергия» означает «энергия неделимого», полученная же атомная энергия в точном научном смысле подразумевает деление такого неделимого. Отрицательным аналогом термина «атомный» было бы слово «anatomic» («атомный»), т. е. уже существующее слово со значением «разделяющий». Поэтому для обозначения энергии после ее освобождения в результате деления атома автор пользуется термином с положительной морфологией «topic» (*томный*), вместо слова с отрицанием, каким является термин «атомный» или «неделимый». Конечно, последнее выражение продолжает оставаться верным для обозначения энергии атома до ее освобождения в результате деления*.

* Строго говоря, Соддп был прав, предлагая новый термин, но исторически он не прижился. — *Прим. ред.*

Условия «томной» детонации

Принципиальное отличие процесса в урановом реакторе от освобождения атомной энергии взрывного типа состоит в факторе времени. Несомненно, неуправляемая реакция в реакторе привела бы к гигантскому взрыву. Но для такого взрыва достаточно и очень незначительной части энергии урана. Практически должно было бы произойти следующее: точно так же как и при химическом взрыве, освобожденная энергия обратила бы в газ близлежащее вещество и разнесла бы во все стороны остальную часть не претерпевшего никаких изменений материала.

Причиной «томного» взрыва является не повышение температуры, а концентрация нейтронов. Необходимое их количество, вместо того, чтобы концентрироваться в уране, мгновенно бы испарилось и остановило бы детонацию почти в тот же самый момент, когда она началась. Таким образом, требуется выделение (концентрирование) из урана-238 изотопа уран-235, являющегося истинным детонатором, для которого уран-238 служит лишь разбавляющей средой. И хотя уран-238 составляет 99% всего урана, его роль в процессе инициирования относительно ничтожна. Это же условие исключает использование в качестве агента детонации тепловых нейтронов, так как скорость их распространения такова же, как и при обычном химическом взрыве, а для «томного» взрыва пригодны только быстрые нейтроны, обладающие скоростью, соизмеримой со скоростью света. Следовательно, поставленная проблема в корне отличается от задачи создания самоподдерживающегося уранового реактора. Подробности изготовления «томной» бомбы, или действительного механизма атомного деления взрывного типа, мало известны, так как информация, касающаяся их, публиковалась крайне скупно. Известны лишь основные необходимые для «томного» взрыва условия: деление должно распространяться со скоростью, достаточной для того, чтобы значительная часть расщепляемого вещества была взорвана прежде, чем рассеяние положит конец процессу. До сих пор также не опубликовано никаких даже приблизительных данных о критической массе, превышение которой вызывает детонацию. Первоначальная теоретическая оценка давала значения от 1 до 100 кг урана-235.

Детонация происходит в момент, когда количество нейтронов, производимых в процессе деления, превышает количество нейтронов, поглощаемых при расщеплении, плюс все потери нейтронов вследствие утечки от поверхностей и поглощения их, ведущего к превращению иным, чем деление. Каждый килограмм урана в результате деления практически освобождает энергию, эквивалентную взрыву 20 000 т тринитротолуола или подобного ему мощного взрывчатого вещества. Создается впечатление, что до сих пор в результате взрыва освобождается лишь немногим менее 1% всей энергии природного урана и что практически изотоп уран-238, при-

существующий в уране, обогащенном изотопом 235 , можно рассматривать скорее как разбавитель, чем как агент, вызывающий разрушительный эффект. В любом случае из-за невозможности изучения «томной» детонации в лабораторных условиях все существующие в пользу этого доказательства следует, по-видимому, рассматривать лишь как очень косвенные и умозрительные.

«Томная» бомба

Проблема создания бомбы была, по-видимому, решена путем разделения заряда на две части. Объемные и поверхностные характеристики каждой из них в отдельности обеспечивают превышение потери нейтронов над их производством. При максимально быстром механическом соединении этих частей создаются новые объемные и поверхностные характеристики суммарной массы, при которых производство нейтронов превышает их потерю, что приводит к мгновенной детонации. Это, при любой данной концентрации первоначально делимого компонента, ограничивает суммарный заряд бомбы до определенного количества, отклонения от которого не могут быть велики. Основная техническая трудность заключается в том, чтобы соединить части заряда за чрезвычайно короткое время. Поэтому, как представляется автору данной книги, все попытки использовать в бомбе больше двух частей заряда неизбежно обречены на неудачу из-за невозможности достижения достаточно точной синхронизации. Кроме того, с военной точки зрения «томный» снаряд был бы, вероятно, предпочтительней «томной» бомбы: деление мощи последней, по-видимому, перспективней, чем увеличение.

Конструкция бомбы с зарядом из двух частей скорее всего предусматривает устройство, при помощи которого одна часть выстреливается в другую каким-либо способом. Неизвестно, устанавливается ли в бомбе с целью достижения мгновенной детонации суммарного заряда источник быстрых нейтронов в виде, например, радий-бериллиевой трубки: для работы уранового реактора такой источник не является необходимым. Предполагается, что процесс инициируется либо нейтронами космического излучения, либо так называемыми рассеянными нейтронами, возникающими в результате спонтанного деления урана или под воздействием α -излучения урана на какой-либо из присутствующих элементов. Следует упомянуть также, что, как и при обычных взрывах, эффективность бомбы во многом зависит от ее уплотнения, корпуса. Максимально плотное вещество, окружающее заряд, замедляет своей инерцией рассеяние содержимого после детонации и играет важную роль в создании условий, способствующих наиболее полному освобождению энергии взрывного типа.

Разделение изотопов урана

Методы, при помощи которых предпринимались попытки получения обогащенного изотопом ^{235}U урана, были чисто физическими: разработанные ранее способы физико-химического разделения более легких изотопов, которые (кроме дейтерия) к 1940 г. были уже полностью или частично отделены, оказались непригодными в данном случае из-за больших атомных масс и небольшой разницы между ними в соответствии с квантовыми факторами (см. главу десятую). Были применены три метода: диффузия паров соединений урана через пористую перегородку; тепловая диффузия соединений урана в жидкой фазе и метод, заимствованный из масс-спектрографии и основанный на различном отклонении в мощных магнитных полях отдельных положительных ионов с различной массой. На практике первый способ чаще всего использовали для предварительного обогащения; второй, менее экстенсивно разработанный, применяли на промежуточной стадии; окончательное отделение осуществляли третьим методом. Такой процесс представляет собой невиданную до сих пор в истории промышленности гигантскую комплексную техническую операцию, проведение которой в настоящее время коммерчески совершенно не оправдывает себя, если иметь, конечно, в виду использование полученного обогащенного урана в мирных целях, для разработки нового источника энергии.

Единственным известным соединением, пригодным для использования в диффузионном процессе, является гексафторид урана UF_6 — твердое вещество с температурой перехода в газообразное состояние при атмосферном давлении 56°C . Оно удобно, поскольку фтор состоит только из одного изотопа, хотя, с другой стороны, и обладает рядом нежелательных химических свойств: высокой химической активностью и неблагоприятными коррозионными характеристиками. Были ли преодолены каким-либо образом эти неудобства, или найдено другое, более подходящее соединение — остается неизвестным. В результате одного процесса диффузии относительное соотношение изотопов изменяется менее чем на 1%, и для достижения достаточно полного разделения требуется проведение тысяч последовательных процессов такого рода в соответствии подготовленным цикле операций. Необходимое для этого количество электроэнергии огромно, и электростанция, построенная в Клинтоне для обеспечения таких операций, была снабжена невиданной до того по мощности паротурбинной установкой. По-видимому, столь огромное потребление энергии для разделения изотопов теоретически неизбежно. Один русский специалист оценил его как сравнимое с количеством энергии, выделяемой при делении получаемого изотопа уран-235. Даже разделение воздуха на составляющие его компоненты физическими методами теоретически потребовало бы затраты не столь уж малого количества энергии. А так как процесс диффузии не применялся до этого ни в одном из

известных ранее технических процессов, то всю технологию пришлось разрабатывать впервые, причем следует отметить, — может быть для наиболее сложного варианта разделения.

Второй процесс — жидкостная тепловая диффузия — был специально разработан для разделения изотопов после успешного применения подобного диффузионного процесса для газов, и, хотя в отношении затрат энергии он был в той же степени экстравагантным, что и предыдущий, его успешно осуществили, вероятно, как дополнительный к двум другим процессам, в промышленном масштабе в Клинтоне. Оба диффузионных процесса задерживают при прохождении рабочих циклов обогащения значительное количество урана, что сильно затягивает завершение цикла операций.

Электромагнитное разделение

Третий метод является прямой противоположностью первым двум почти во всех отношениях. Он дает относительно высокую степень обогащения за одну стадию, но лишь для очень малых количеств в одной установке. В самом начале для получения 1 мг изотопа требовались месяцы работы, и все же в течение примерно года обогащенный уран, срочно требовавшийся для получения необходимых экспериментальных данных, добывали именно таким способом. Первая установка такого рода была построена на основе магнита от масс-спектрографа с диаметром полюсов 92 см; она была названа *калютроном* (от сокращения «Калифорния Юниверсити Сайклотрон»). Позже для работы в этой же области был временно приобретен магнит строившегося в то время циклотрона в Беркли массой 5000 т и диаметром полюсов 460 см. Выход изотопа постепенно увеличивался и стал значительным.

Установка для промышленного разделения изотопов, также построенная в Клинтоне, по своему конструкционному принципу представляла собой одно из самых парадоксальных сооружений. Она состояла из некоторого количества одинаковых лабораторных аппаратов, в каждом из которых использовался колоссальный электромагнит, и давала требуемый для проведения экспериментов выход простым сложением продукции всех аппаратов. Это не что иное, как применение метода, подразумевающего работу с каждым из атомов индивидуально, как с людьми, но только в массовом промышленном масштабе. Что это такое — нетрудно себе представить, если вспомнить, что в малейшей видимой невооруженным глазом крупинке урана больше атомов, чем всех живущих на Земле людей. Но даже с учетом всего этого описанные процессы представляют собой лишь половину всей технологии, при помощи которой в конце концов было получено концентрированное расщепляемое вещество в количестве, достаточном для изготовления трех бомб. О второй половине изысканий еще предстоит рассказать.

Ведь, как уже было упомянуто, такая же интенсивная работа велась по созданию самоподдерживающихся урановых реакторов. И только потому, что она предлагала другой альтернативный метод достижения той же цели.

Трансурановые элементы

Все это возвращало обратно к реально существующим трансураниевым элементам, первый из которых, № 93, является продуктом β -распада с периодом полураспада 23 мин урана-239, производимого в процессе нежелательного резонансного захвата изотопом ^{238}U нейтронов с промежуточной энергией. Этот производный элемент № 93, в свою очередь, излучает β -частицы, превращаясь с периодом полураспада 2—3 суток в элемент № 94. Полученные два новых элемента, находящиеся за пределами периодической системы естественных элементов, были очень удачно названы *нептунием* и *плутонием* соответственно. По аналогии с естественной радиоактивностью ожидалось, что плутоний будет испускать α -излучение и, таким образом, превращаться в изотоп урана-235. Это действительно подтвердилось, хотя превращение оказалось таким медленным (период полураспада плутония был первоначально оценен по крайней мере в 1 млн. лет, а позже — в 24 000 лет), что элемент в этом отношении столь же стабилен, как и уран.

Было высказано предположение, что, подобно урану-235, плутоний подвержен делению медленными нейтронами, и если бы это действительно оказалось так, то, будучи элементом, несходным с ураном и потому отделимым от него химически, он мог бы избавить ученых от поистине фантастических усилий разделить два вида урана при помощи калютрона и диффузионных процессов. Предположение подтвердилось, хотя в некотором отношении такая замена была все равно что попасть из огня да в полымя. Она поставила перед учеными инженерные проблемы, разрешение которых тоже нельзя назвать иначе, как фантастическим.

Плутоний

Все циклотроны США были сразу же переоборудованы для получения искусственного плутония бомбардировкой урана сначала дейтонами, а затем нейтронами. В результате получили два различных изотопа, что не явилось существенным препятствием, поскольку речь шла об исследовании химических свойств плутония. К концу 1942 г. было собрано 0,5 мг вещества, которого оказалось достаточно для того, чтобы радио- и микрохимии определили его основные химические свойства и предложили в общих чертах методы промышленного отделения от урана плутония, получаемого в

реакторе. На этом мы должны оставить обсуждение чисто научной чрезвычайно важной и интересной перспективы, связанной с продолжением периодической таблицы элементов на два места, к № 95, америцию, и к № 96, кюрию,—чтобы покончить с историей завершения военных изысканий, продуктом которых стала «томная» бомба.

Промышленные реакторы в Ханфорде были сооружены для того, чтобы получать плутоний, а не электричество. Задача была сформулирована как чрезвычайно важная и включала получение от каждой установки по несколько граммов плутония в сутки. Это количество приходилось на несколько тонн отработанного урана; тонна же, как известно, состоит из миллиона граммов. Масштабы производившейся в Ханфорде работы можно сравнить с мощностью большой гидроэлектростанции: при получении одного грамма плутония в сутки освобождалась тепловая энергия, эквивалентная 1000 квт. Количество воды, необходимое для охлаждения ханфордской системы установок, могло бы обеспечить водоснабжение крупного города.

Самым удивительным во всей второй половине изысканий было то, что все это гигантское предприятие было задумано и спланировано еще в тот момент, когда первый из существующих реакторов мощностью 200 вт только-только был приведен в действие. Излучение реактора исключает проведение в нем каких-либо ремонтных работ после его запуска. Для нормальной работы реактор должен быть полностью защищен со всех сторон тяжелыми бетонными и стальными щитами, воздухонепроницаемыми, насколько это возможно, чтобы предотвратить излучение нейтронов и утечку радиоактивных газов. Процесс загрузки и извлечения уранового топлива должен осуществляться целиком и полностью извне посредством дистанционного управления. Металлический уран отливают в виде цилиндрических стержней и «консервируют» в воздухонепроницаемых алюминиевых чехлах, предназначенных для защиты его от коррозионного воздействия водяного охлаждения. Стержни должны вводиться в реактор через горизонтальные цилиндрические каналы, которыми перфорирована кубическая активная зона, затем извлекаться с другой стороны и подвергаться переработке в соответствии с твердо определенным графиком всего процесса.

Инженерное проектирование установки по переработке топлива ставило еще более сложные технические проблемы. Установка находилась на две трети под землей. Она разделялась вдоль на отдельные ячейки и простиралась на 30 м. Операции по растворению урана и безопасному удалению чрезвычайно радиоактивных газов (изотопов иода, ксенона и криптона), отделению плутония от превосходящего его по количеству в несколько миллионов раз урана и потом от высокоактивных и очень опасных продуктов деления, насчитывающих до 20 элементов (причем отделения до такой степени чистоты, при которой работа с полученным плутонием

была бы относительно безопасной), должны были проводиться при одном и том же трудном условии: дистанционном управлении ими с точки, находящейся далеко за пределами реактора. В довершение всего весь этот комплекс работ должен был обеспечиваться реактором, построенным еще до того, как стало известно, какие методы химического отделения будут приняты, а сами методы были определены на основе химического анализа крупинки вещества, едва видимой невооруженным глазом и составляющей в тот момент все его мировые запасы. И что же: как мы знаем, проект был успешно осуществлен с самого начала и до самого конца! Вот уж поистине «смелость города берет»!

«Пробный» реактор, к этому времени построенный в Клинтоне, начал работу в 1944 г. и стал производить при расходе 1 т урана за трое суток к концу февраля этого года несколько граммов плутония. Его эффективность с начала 1944 г. повысилась до 80—90%.

«Отравление» уранового реактора

Тем не менее, несмотря на все успехи, при работе промышленных реакторов вскоре был обнаружен неожиданный и никак непредусмотренный эффект, который, по-видимому, намного усложнил разработанный процесс разделения и показал, что он менее практичен, чем надеялись. Этот эффект принято называть *отравлением*, вероятно по аналогии с использованием этого термина в химии, где он означает уничтожение или потерю каталитической активности по причинам, которые приписываются загрязнению катализатора следами обрабатываемого или участвующего в реакции вещества или веществ, получаемых из реагентов и действующих как «яды». Механизм такого загрязнения пока до конца непонят. В рассматриваемом случае его связывали с накоплением продуктов реакции, т. е. плутония и продуктов деления, которые, по-видимому, являются необыкновенно сильными поглотителями нейтронов. Их накопление постепенно стремится сократить количество нейтронов, при помощи которых в установке поддерживается реакция на заданном уровне. Согласно официальным источникам, этот эффект едва не приостановил работу реакторов в Ханфорде, «о чем впоследствии будут приведены более подробные данные» (никаких более подробных сведений, естественно, опубликовано не было).

По-видимому этим же эффектом объясняется очень краткий промежуток времени пребывания урана в реакторе — фактор, обуславливающий проведение сложного процесса переработки и очистки каждый раз для относительно ничтожного количества получаемого плутония. Поскольку в результате поглощения плутонием нейтронов происходит потеря последних, она, по-видимому, возме-

щается производством новых нейтронов, необходимых для поддержания реакции, т. е. за счет потери плутония. Этот эффект, несмотря на то что в иных условиях плутоний стабилен, должен в конце концов привести к тому, что плутоний прекращает накапливаться, и если его не удалить, его количество начнет уменьшаться. Что касается потерь, возникающих вследствие поглощения нейтронов продуктами деления, то этот эффект должен в случае достаточного их накопления останавливать работу реактора вообще.

Таков вкратце основной фактор, бросающий тень сомнения на предположение, что этот альтернативный метод отделения урана-235, в противоположность физическому, сможет обеспечить освобождение 99,3% атомной энергии изотопа 238, как это первоначально предполагалось. Нерешенность проблемы «отравления» является одним из самых важных факторов, препятствующих правильной оценке того, какую роль может сыграть атомная энергия в будущей истории человечества.

США имели всего три бомбы

История того, как была достигнута поставленная военная цель, не нуждается в пересказе. Упомянем, что к середине июля 1945 г. полученного количества расщепляющегося материала уже было достаточно для того, чтобы произвести секретные испытания оружия в Лос-Аламосе, где в то время располагались лаборатории, занимавшиеся связанными с изготовлением «атомной» бомбы изысканиями. За испытанием 6 августа последовало разрушение Хиросимы, а несколько позже — и большей части Нагасаки: вместе с городами было уничтожено и их население; оно погибло в результате воздействия световой вспышки, ударной волны и смертоносного излучения, вызывавшего смерть от анемии и подобных ей лучевых болезней.

В США считали, что первая бомба была начинена изотопом уран-235, а вторая плутонием: со стороны властей эта точка зрения не была ни подтверждена, ни опровергнута. Совсем недавно, в январе 1947 г., бывший министр обороны Генри Стимсон сообщил, что взорванные три бомбы были в то время единственными имевшимися: тем самым он подтвердил то, о чем подозревали многие из ученых, понимавших, каких усилий стоит разделение изотопов урана. Их догадка оказалась правильной.

Периодический закон в новом освещении

Не углубляясь в многочисленные сложности, теперь можно описать в общих чертах наиболее важные научные выводы, следующие из продолжения таблицы химических элементов за преде-

лы ее естественной границы — элемента урана. Это продолжение представляет для автора книги особый интерес: он всегда считал, что последовательность естественных элементов уже продвинулась на три места дальше (т. е. до радия — № 88 и актиния — № 89), чем это следовало из предшествовавшего хода эволюции. Ведь в предыдущем периоде с места № 57 (лантана), химического аналога актиния (№ 89), начинается серия из 15 (с одним незанятым местом) последовательных элементов, известных под названием *редкоземельные элементы* и обладающих в основном подобными химическими характеристиками: трехвалентностью в основных соединениях и практической химической неотделимостью, наиболее высокой до открытия изотопов.

По-видимому, в последнем периоде таблицы повторяется то же самое, за исключением того, что вместо начала с № 89 (актиния) серия идет от элемента, расположенного на три места дальше, от № 92 (урана), и продолжается последующими элементами № 93—96 — нептунием, плутонием, америцием и кюрием — близкими копиями урана, хотя, насколько это сейчас известно, менее похожими на него, чем редкоземельные друг на друга в начале своей серии.

Трансурановые элементы образуют много рядов солей с тенденцией, по мере удаления от начала серии, к упрочению трехвалентного состояния: последний известный из них — кюриий дает лишь трехвалентные стабильные соли.

Одним из наиболее важных научных следствий нового метода производства нейтронов в урановом реакторе является возможность продолжения ряда элементов за пределы так называемых естественных: в далекой перспективе она может, в конце концов, приобрести и практическое значение. Радиохимик, высказавший это предположение, Г. Т. Сиборг работает в настоящее время в Чикагском университете. Автор книги приносит также свои извинения большому кругу ученых, сделавших крупные открытия в ходе засекреченных изысканий, описанных в этой главе, за невозможность упоминания их имен, известных, возможно, лишь их непосредственным коллегам.

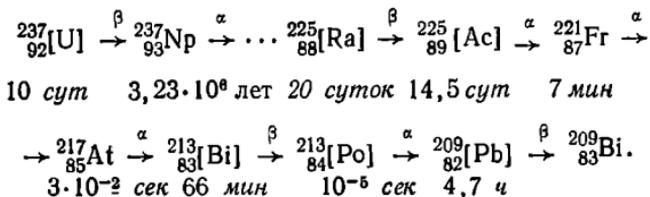
Сейчас мы знаем, что помимо плутона в урановом реакторе образуется также небольшое количество стабильного изотопа нептуния. Два других элемента получаются в результате бомбардировки урана α -частицами с энергией 40 Мэв в самом мощном циклотроне в Беркли, магнит которого имеет полюса диаметром 150 см и весит 220 т. Сиборг предсказывает, что когда еще больший циклотрон с 450-см полюсами (его постройку прервала война) будет приведен в действие (ожидается, что этот циклотрон сможет генерировать частицы энергией до 400 Мэв), возникнет возможность деления атомов более легких и искусственного получения новых элементов, что откроет совершенно новую главу в науке об атоме.

Нептуний

Кроме радиоактивного изотопа уран-239, быстро превращающегося через нептуний в плутоний (оба изотопа имеют одно и то же массовое число), в урановом реакторе образуется также еще один радиоактивный изотоп урана с массовым числом 237 по типу превращения, довольно нередкому у тяжелых элементов и происходящему под действием нейтронов с достаточно высокой энергией. Такое превращение подразумевает итоговую потерю, а не приобретение одного нейтрона ядром, подвергшимся бомбардировке. Нептуний-237, получаемый из этого изотопа урана в результате довольно короткого β -распада, является сравнительно стабильным элементом с периодом полураспада свыше двух миллионов лет; сам же он излучает α -частицы. Следовательно, нептуний, как же как и плутоний, можно получать в макроколичествах, чего нельзя сказать о других двух элементах — америции и кюри.

Новый изотоп нептуния, обладающий продолжительным сроком жизни (в современном обозначении ${}_{93}^{237}\text{Np}$), и порождающий его ${}_{90}^{237}\text{U}$ дают начало радиоактивному ряду нового типа, до этого неизвестному и названному рядом $4n+1$, где n — целое число. Как и во всех радиоактивных распадах, при этом распаде излучаются только α - и β -частицы, причем первая понижает массовое число на 4, а вторая оставляет его неизменным. Эта формула представляет все члены любой такой серии.

Среди известных радиоактивных рядов торневый ряд является рядом $4n$, ряд урана $4n+2$, ряд актиния $4n+3$, в то время как ряд $4n+1$ неизвестен, — факт, уже давно представляющий немалый теоретический интерес. Согласно диаграмме этих четырех рядов, подготовленной Ф. Панетом и продемонстрированной недавно на выставке в Музее науки (Южный Кенсингтон, 1947) в связи с празднованием столетия Химического общества, из ${}_{93}^{237}\text{Np}$ после превращений, состоящих из трех α - и одного β -распадов, соответствующим трем неизвестным до сих пор членам, остаток этого искусственного ряда $4n+1$ сейчас известен. Он включает в себя восемь членов, из которых последний является обычным стабильным висмутом, а остальные — изотопами элементов от радия до свинца. Этот новый ряд проходит через свободные места с атомными номерами 87 и 85, которые не затрагивались тремя другими рядами; соответствующим элементам были присвоены названия *франций* и *астат*. Серия $4n+1$ приводится ниже. Квадратные скобки указывают на то, что эти члены являются новыми изотопами известных элементов, имеющих данные символические обозначения; символы Fg и At используются для обозначения № 87 и 85; в нижнем ряду дано среднее время жизни членов ряда:



Тот факт, что некоторые детали этого чрезвычайно интересного искусственного ряда $4n+1$ были выведены путем умозаключений и еще не подтверждены экспериментально, не вызывает сомнений. Несомненно также и другое — эта формула приводит в довольно гармоничное целое колоссальный ряд фундаментальных открытий в физике, полностью преобразивших наши представления об атоме. Этим открытиям, не предвещая и сотой доли появившихся затем перспектив, положило начало одно простое наблюдение Анри Беккереля, сделанное им в 1896 г. Он обнаружил, что определенные соли урана, флюоресценцию которых изучали еще его отец и дед, непонятным образом засвечивали фотографическую пластинку, находящуюся в светонепроницаемом чехле между двумя плоскими кусками металла. Самым удивительным было то, что соли урана находились вне чехла, а сама пластинка никогда до этого не подвергалась воздействию света!

Глава тринадцатая. БУДУЩЕЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ *Предварительные итоги*

Вот мы и пришли к концу рассказа об истории освоения атомной энергии, — впрочем, конечно, лишь настолько, насколько сейчас можно судить о ней по печатным источникам и реальным вкладам в фундаментальное естествознание. Нам бы хотелось, чтобы эта книга помогла широкому кругу читателей проследить происхождение многочисленных новых идей и открытий в ядерной физике, ибо мы уверены, что современное состояние этой сложной науки нельзя понять, не зная ее истории. Вместе с тем мы живем теперь в столь новом физическом мире, что всякие аналогии (за исключением лишь самых общих) являются опасными советчиками.

Тем не менее автору кажется необходимым выразить собственное критическое мнение как в отношении развития теории радиоактивного распада (и тесно с ней связанного освоения атомной энергии человеческим гением), так и в отношении того, какой длинный путь, видимо, должен еще быть пройден, прежде чем станет возможным экономически выгодное применение атомной энергии в мирных целях.

Очевидно, пора рассмотреть чрезвычайно важную для общественной жизни проблему, связанную с новыми достижениями в ядерной физике, — проблему ответственности науки в целом и каждого отдельного ученого перед всем человечеством. Естественно, здесь автор хотел бы выразить собственные взгляды на эту проблему. Однако не вина автора, что его взгляды в этой области остаются неизвестными, так как со времени первой мировой войны, т. е. в течение последних 25 лет, он практически был единственным, кто уделял серьезное внимание процессу дегуманизации науки и, насколько это было возможно в те дни для человека, никем не поддерживаемого, делал все от него зависящее, чтобы его взгляды стали известны широкой общественности. Впрочем эти взгляды, как и предложенные тогда рецепты, остаются неизменными.

Как известно, легко нажитый капитал используется прежде всего с корыстными целями и поэтому пагубно влияет на всю систему распределения товаров. Именно здесь, а отнюдь не в расширившихся возможностях производства и прогрессе в науке автор видит корень зла. Недаром крылатая фраза о том, что современный век науки — это «нищета среди изобилия», является весьма точной характеристикой нашей эпохи. Однако общество никогда не стремилось понять причины создавшейся ситуации. Ныне каждого волнует лишь одно: как бы не отстать от большинства, не оказаться белой вороной. Однако фактически мнение большинства едва ли оказывает хоть какое-нибудь влияние на ход дальнейших событий, — теперь еще в меньшей степени, чем раньше.

В этой заключительной главе автор, конечно, говорит лишь от своего лица, совершенно пренебрегая официальной точкой зрения. Что касается военного аспекта проблемы, то здесь автор исходит лишь из опубликованных материалов. Условия секретности, навязанные тем, кто непосредственно отвечает за успех ведущейся в военных целях работы, препятствуют объединению интеллектуальных усилий ученых. Но даже если бы такое общее мнение ученых и сформировалось, оно не имело бы особой ценности. Дело в том, что атомная энергия, кажется, становится еще одной политической приманкой, которая позволяет народам Земли питать совершенно необоснованные надежды.

По мнению автора, пока еще рано делать главные выводы. Имеющиеся достижения не позволяют думать, что чисто научная проблема уже настолько решена, чтобы стать делом прошлого. Разрушать всегда легче, чем сооружать. Это положение особенно справедливо для недавно завоеванных наукой областей знания. Теперь всем очевидно, что если не предотвратить применение атомного оружия, то оно погубит все то, что мы зовем цивилизацией. Ведь даже если кто-то и останется в живых, то это будут жалкие

группки людей, обреченных на плачевное существование, поддерживаемое, по-видимому, примитивным земледелием. Очевидно, что в таком случае на смену науке пришел бы примитивизм. И все же нет уверенности, что современный уровень знания обеспечивает нашему типу цивилизации быстрое и свободное развитие. Пока наши знания не перешагнули грани чисто научных поисков, и мы не можем надеяться, что все наши прогнозы (в области техники) оправдаются.

Естественные источники урана

Демонстрация страшной разрушительной силы атома потрясла всех и вызвала бурю жарких споров. Это свидетельствовало о том, что в общем плане проблема создания бомбы была решена, хотя фактически был реализован лишь ее частный случай, а именно использовался лишь изотоп урана уран-235, содержание которого в естественной смеси его изотопов составляет менее 1%. Уран, в процессе распада которого образуется радий, сам по себе, как известно, существует в достаточных концентрациях лишь в весьма редких месторождениях, хотя их поиски на земном шаре ведутся уже 40—50 лет.

Практически весь полученный до сих пор радий был добыт из четырех месторождений. Во-первых, из старого серебряного рудника в Яхимове (Чехословакия); во-вторых, из долины Парадокс-Вэллс (шт. Колорадо) и из других американских залежей карнитита с низким содержанием урана, но зато легко разрабатываемых; далее, из богатых залежей многих сотен тонн урановой смолки в Катанге (Бельгийское Конго)* и, наконец, из еще более богатых рудников в районе Большого Медвежьего озера (за Полярным кругом, в Канаде). Даже по своему географическому распределению уран кажется исключительным, так как никакой другой тяжелый элемент, кроме свинца, не встречается в столь малом числе рудных месторождений. Впрочем, в какой-то мере это относится и к торию, но здесь подобное явление обусловлено действием волн и ветра, концентрирующих бесконечно малое количество более тяжелого монацитового песка, который встречается во многих горных породах, вдоль некоторых морских побережий или в районах, когда-то занимаемых морем.

Зачем впустую растрчивать уран?

Конечно, уран вооружил науку новым могучим средством исследования. И автору кажется, что в ближайшие несколько лет этот уникальный, а возможно и незаменимый, элемент должен слу-

* Ныне пров. Шаб, Заир. — Прим. ред.

жить в первую очередь научным целям. Именно такого применения достойны его уникальные свойства. Достижению иных целей могут служить иные средства. Что касается поспешных предложений использовать уран на самолетах и даже кораблях, то смертоносный характер испускаемого им излучения делает все такие попытки крайне опасными*.

В мае 1947 г. было обнаружено, что корабли, использованные десятью месяцами ранее в качестве мишеней на полигонах в районе Бикини, все еще опасны для жизни из-за наведенной радиоактивности. Единственная реальная защита против смертоносного излучения — соблюдение закона квадрата расстояния, общего для всех типов излучения. Примером завода, который, кажется, может действовать, не угрожая жизни людей, может служить завод в Ханфорде (США): он максимально удален от населенных пунктов и полностью или частично расположен под землей.

Интенсивность и количество в энергетике

А теперь пора приступить к более четким формулировкам. У нас пока нет оснований полагать, что когда-нибудь мы сможем управлять интенсивностью индивидуального атомного распада или энергией деления. Под контролем здесь следует понимать управление числом атомов, которые претерпевают распад в единицу времени. В каждом акте деления выделяется огромное количество энергии — от 100 до 200 Мэв (для сравнения укажем, что при распаде радия выделяется лишь от 1 до 10 Мэв). Вероятно, по своим физическим и биологическим свойствам излучение, возникающее при делении атомов урана, еще опаснее для живого организма, чем все известное раньше.

Дело в том, что подобного рода скачок в развитии энергетики открывает перед нами путь к новым техническим достижениям и любая попытка принизить его значение является шагом в ложном направлении. По-видимому, достаточно близкие аналоги дают обычные взрывчатые вещества. В мощных современных взрывчатых веществах, таких, как динамит и тринитротолуол, взрывной способностью обладают отдельные молекулы, а не их смесь, разбавляемая до нужной концентрации, как поступают с порохом и взрывными смесями для газовых двигателей. Взрывчатые вещества можно использовать в целях разрушения, но нельзя использовать в целях производства энергии.

Итак, по факту, цели разрушения, которым атомная бомба уже служила, кажутся ее очевидным естественным применением. Атомную энергию можно было бы с успехом использовать в мир-

* Ныне, благодаря успехам науки и техники, такие реакторы сконструированы для транспортных целей. — *Прим. ред.*

ных целях, например, для решения практических задач в горном деле, которые нельзя решить иным, невзрывным способом; для прокладки более коротких коммуникаций между океанами; для орошения обширных и далеко отстоящих от водных ресурсов районов земного шара и т. д. По этой причине кажутся малопродуманными выдвинутые недавно Комиссией по атомной энергии предложения «изменить естественные свойства» делящегося материала до возможного использования, чтобы сделать нерациональным восстановление его взрывных свойств и свести его применение только к мирным целям, ибо тогда атомное топливо будет малопригодно и для технических целей вообще.

Пока же промышленные атомные установки малоэкономичны. Так, атомный комплекс в Ханфорде тратит слишком большое количество энергии впустую (для нее можно было бы найти лучшее применение, чем нагревание воды в реке Колумбия). Впрочем, это же относится (может быть, не в таких катастрофических размерах) ко всем крупным заводам, работающим на обычном топливе — угле и нефти. Эти заводы по сходным соображениям построены на больших реках, и значительная часть энергии теряется даром. В обоих случаях это никак не используемое тепло могло бы найти применение в интенсивном орождении для обогрева парников, если бы в конце прошлого века люди не были так преступно расточительны с запасами топлива. Естественно, если бы мировые ресурсы традиционного топлива истощились до того, как их окончательно вытеснили новые источники энергии, то не могло бы быть и речи о более или менее частичной замене старого новым.

Бесспорно, пока речь идет о чисто технических сложностях, инженерам можно доверить подготовку уранового реактора к работе при более высокой температуре, чтобы он служил мощным источником энергии, а не только «расточителем» тепла. Но нужно помнить, что радиоизлучение губительно действует не только на человеческий организм, но и на многие обычные технические материалы, и в современной ситуации осуществить это предложение пока абсолютно нерентабельно (это может напомнить пальбу из пушек по воробьям), хотя впоследствии это может и не оказаться химерой.

Нераскрытые возможности

Есть основания полагать, что должен быть пройден долгий путь, прежде чем новая область сможет дать что-нибудь выгодное в экономическом отношении. Как бы ни были трудны, а в какой-то мере и героичны эти первые успехи, дальнейший прогресс отстает по времени тем дальше, чем больше в отдельных успехах демонстрируются чудеса филигранного мастерства экспериментатора и гигантские возможности энергии и продуманное до тонкостей

приборное обеспечение. Обычно в любом значительном техническом скачке вперед наибольшее значение имеет именно первый шаг, но в данном случае мы, кажется, наблюдаем что-то похожее на снятие сливок с молока. Явление отравления реактора в соединении с уже отмеченным мистическим указанием на «изменение естественных свойств» делящихся материалов только подтверждают это наблюдение. Но основная причина состоит в том, что в урановых реакторах активный изотоп уран-235 непрерывно выгорает без всякого замещения его новыми порциями. Критические условия, при которых работают нынешние реакторы, чрезвычайно жесткие (к тому же доля урана-235 составляет лишь 0,7% природной смеси) даже при использовании свежих топливных элементов с ураном и отсутствии посторонних поглотителей нейтронов, которые все-таки присутствуют (например, вода охлаждающей системы). Если бы охлаждающее устройство было достаточно сложным, чтобы обеспечить надежность работы реактора при высокой температуре, то это лишь приблизило бы систему в целом к той точке, когда поглощение нейтронов прекратило бы работу реактора даже при наличии неиспользованного урана в его топливных элементах. Поэтому все меньшая и меньшая часть и без того малой пропорции (0,7%) изотопа урана-235 станет доступна для получения атомной энергии, — и по этой причине, и по причине медленного выгорания его в процессе работы реактора.

Здесь мы подходим к вопросу, на который полученные пока данные не дают ответа, а именно: при условии строго «мирных» целей насколько способен плутоний, отделенный от «ядовитых» продуктов деления и вновь помещенный в реактор, компенсировать выгорание урана-235? Даже если на каждый атом урана-235 образуется более одного атома плутония, то первоначальная надежда, что этот метод может позволить использовать внутриатомную энергию урана-238, составляющего 99,3% в естественной смеси изотопов, становится возможной лишь теоретически, но не практически.

Кажется, это является существенным пробелом в наших знаниях. И не удивительно, если в ближайшее время именно здесь развернутся основные исследования. Но существующие пока данные, по-видимому, ставят под вопрос пригодность урана-238. Если бы он был доступен, тогда альтернативное использование очищенного плутония для атомных бомб, вместо его повторного использования в атомных реакторах, все еще оставалось бы непредусмотренным. Дело в том, что официальный отчет США под названием «Атомная энергия» в заключительной части ставит перед учеными задачу помочь своим согражданам выработать мудрые политические взгляды относительно применения атомной энергии. При написании заключительной главы данной книги автор опирался именно на эту публикацию. Однако в этом отчете весьма туманно освещена проблема так называемого «отравления реактора». Намеки же на «лишенный своих природных свойств» уран еще бо-

лее запутали дело. Как говорилось выше, всякий такой процесс дезактивации урана, даже при эффективности, дает материал, совершенно непригодный для какой-либо достойной цели.

Новые виды излучений и мутации

И наконец, надо упомянуть о других возможных влияниях на наше существование, связанных с новым видом излучения, оказавшимся в распоряжении человечества (хотя автор напоминает читателю, что он в этих вопросах не специалист).

Может быть, именно в этих новых видах излучения следует искать ключ к нерешенным проблемам эволюции. Не так давно Х. Томас выдвинул, как тогда казалось, довольно утопическую идею, что мутации у растений и происхождение новых видов жизни могли быть вызваны космическим излучением. Подтверждение этого в основном находили в распределении растительных видов. На высоких плато встречается большее разнообразие растительности, чем на уровне моря; например, существует 330 видов горных примул и только 19 видов — равнинных. В Коста-Рике, узкой зоне, половина которой возвышается на 900 м над уровнем моря, растет столько же видов хвощей, как и во всей юго-восточной части США. Сельскохозяйственные злаковые культуры мира произошли из 7—8 горных мест, расположенных в географическом поясе в пределах 40° от экватора. Раньше все это могли объяснить влиянием ультрафиолетового излучения, наряду с космическим. Теперь, однако, считают, что рентгеновское излучение или, согласно последней точке зрения, нейтроны способны производить мутации в делящихся клетках, и одна из Нобелевских премий за 1946 г. присуждена американскому ученому доктору Дж. Мюллеру за работу в этой области.

Благодаря американскому журналисту Джону Херси мы узнали, что вскоре после атомного взрыва в Хиросиме там так быстро распространилась цветущая растительность, что она буквально заполнила все выжженное взрывом пространство. Объектом серьезного медицинского исследования должны стать различные животные, подвергнутые действию излучения при взрывах атомных бомб во время серии испытаний на атолле Бикини, а также жертвы бомбардировок Хиросимы и Нагасаки. Хотя, согласно сообщениям, двое ведущих ученых, занятых на последних стадиях сборки атомных бомб, погибли в результате полученных ими суммарных доз излучения, до сих пор ничего не известно о каких-либо биологических последствиях воздействия этих процессов на весь обслуживающий персонал атомных заводов.

С самого начала для этих ученых были предприняты самые тщательные меры предосторожности против излучения и для обнаружения начальных симптомов болезни с целью сохранить их здо-

овые. Пока слишком рано высказывать суждение, действительно и слабое излучение может как-то необычно влиять на здоровье, ли такое влияние оказывает недавно достигнутый уровень энергооборуженности развитых стран. Но при любой попытке предвидеть возможные последствия с достаточной уверенностью можно считать уже известным биологическое проявление облучения.

Правильное использование новых знаний

Лучшая надежда на будущее атомной энергии связана скорее мудрым использованием накопленных чисто научных знаний прежде всего для того, чтобы расширить эту область и получить новые данные, а не растрачивать ценный материал и усилия на безрельсовые технологические проекты с очень неясными перспективами. Урановый реактор остается пока единственным мощным источником нейтронов, нехватка которых была ранее серьезнейшим препятствием на пути к научному прогрессу. В то же время новая теория ядра (скорее напоминающего жидкую каплю, чем пространственную структуру, подобную молекулярной) позволяет ожидать, как показал Г. Сиборг, что посредством дальнейшей разработки оригинальных методов достижения более высоких уровней энергии могут открыться новые и неожиданные возможности подхода к данной проблеме. Они могут оказаться менее ограниченными в своей применимости, чем все ранее использованные.

Совершенно особняком от рассматриваемой проблемы охраны мира (если мир нужно спасти от разрушения и сделать невозможным использование атомной бомбы в качестве военного оружия) стоит международный научный контроль над всеми исследованиями в этой области, ибо только тогда могут быть экономически оправданы принимающие огромные размеры усилия и расходы. Но еще более важной причиной является то, что требуется значительно более сложная техника, которая слишком трудна для тех, кто надеется все изучить самостоятельно с самого начала; таким образом, будет доступен предел современных знаний, поэтому эта деятельность должна протекать под непрерывным наблюдением профессиональных экспертов и сделаться доступной для ученых всего мира в соответствии с их специальными запросами.

Рабочий пример международной науки

До сих пор в этой области имеется масса примеров того, как невежды руководят специалистами, именно поэтому теперь мир, как никогда, находится в опасности. Думается, нелишне было бы показать читателю, что автор имеет в виду, говоря о международном

контроле и сотрудничестве. Дело в том, что с начала XX в. был один-единственный хороший пример сотрудничества в научных целях, ставший возможным благодаря умелому претворению в жизнь благих намерений в деле подготовки лабораторного персонала на более высоком профессиональном уровне — для повышения эффективности их работы. Речь идет о всемирно известной криогенной лаборатории Лейденского университета в Голландии, куда собрались исследователи со всего мира, желающие изучить явления, происходящие при низкой температуре. Конечно, каждый из приехавших на стажировку был мастером в своей области, но в данной лаборатории он постигал методы достижения низкой температуры с помощью специально подготовленных операторов.

Хотелось бы, чтобы то же самое произошло и с гигантским циклотроном в университете Беркли (шт. Калифорния): когда он будет усовершенствован и заработает, он должен стать доступным для должным образом подготовленных исследователей из всех стран. Это будет гораздо лучше, чем если бы каждая страна пыталась самостоятельно достичь того, что было уже сделано пионерами в данной области.

Наука и общество

Из сказанного выше вытекает более общая проблема, а именно: как относится научный работник к обществу, сознает ли он всю ответственность за результаты своей работы, которые должны быть использованы во благо, а не во зло человеку. Проблема социальной ответственности ученого не была затронута автором в других главах; казалось, она оставалась за пределами данной книги. Однако любому современному ученому теперь уже недопустимо обходить стороной столь насущные вопросы, хотя еще не так давно их замалчивание могло представляться оправданным.

Дело в том, что до недавнего времени автор принадлежал к единственной профессиональной группе, мозг которой общество может использовать по своему усмотрению. От нас, ученых, ожидали, что мы будем поступать так, как приказано, подобно любому внику в недрах военного или экономического механизма. Если раньше люди верили, что профессиональный врач властен над жизнью и смертью одного человека, то ныне люди наделили такой же властью ученого-исследователя — но уже над целым миром. Но врач в своих действиях руководствуется нормами профессиональной этики; кроме того, от него требуют клятвы Гиппократова, которую он должен принять, прежде чем ему позволят заняться практикой, — все это служит гарантией того, что его знания не будут использованы во вред людям. Как видим, до последней войны эти требования гарантировали благополучному обществу, по крайней мере, сравнительное спокойствие.

Достоинно упоминания, что сэр Генри Дэйл, бывший президент Лондонского Королевского общества, профессиональный медик, своим недавним посланием в Вашингтон внес существенный вклад в дело мира. Он предложил университетам разных стран объединиться и принять международное соглашение, запрещающее вести научную работу под покровом военной секретности. В то же время наш новый президент сэр Роберт Робинсон, химик-органик, чьи исследования лежат на границе с биохимией, в своем первом годовом послании к членам Королевского общества одобрил одно из немногих оставшихся еще прав английских университетов: исключить из своих внеучебных контрактов те пункты, которые ограничивают свободную публикацию научных результатов. Может быть, никто другой не придавал бы большого значения этому вопросу, однако сэр Роберт Робинсон справедливо указал, что нет четкого различия между миром и войной и что нелогично осуждать ученых в мирное время за то, за что их так превозносили во время войны. Он предложил ученым объявить вне закона все формы «тотальной войны»: бомбардировку городов с воздуха, химическую войну, биологическую войну, применение атомных бомб и любых других видов оружия массового уничтожения, которые могут быть изобретены в будущем. Однако еще у всех свежи воспоминания о том, что ученые не сделали ни малейшей попытки к запрещению этих видов оружия во время минувшей войны, и никто не ожидает серьезно ни от них, ни от кого-либо другого большей стойкости духа в случае возникновения новой войны.

Полное уничтожение войны

Хотя ученые США первыми несут ответственность за научные работы, приведшие к созданию атомной бомбы, они абсолютно единодушны в осуждении не только самой «тотальной войны» (сторонники которой обрекают тем самым человечество на полное уничтожение), нет, они стоят за «тотальное уничтожение войны», видя в этом единственную логическую предпосылку выживания человечества. Бесспорно, в этом они идут рука об руку со всем человечеством, стремящимся к миру. Попытка спрятаться от данной истины, старой как мир, за ширму бессмысленных фраз, конечно, никого не утешит. Это всего лишь последняя попытка слепого быть поводырем слепого же.

По мнению автора, до тех пор, пока не будет существовать международный форум авторитетов в области науки (как это предложил сэр Генри Дэйл), достаточно сильный, чтобы заставить ученых, как, например, врачей, подчиняться кодексу этики, разработанному для их защиты и руководства, и принять общую клятву в том, что они никогда не будут способствовать своими исследованиями войне (конечно, эту клятву они должны принять прежде,

чем им поручат заниматься научными исследованиями, пока не найдется власть, достаточно сильная, чтобы запретить это и изменить условия работы ученого, что особенно касается случая использования более дорогих материалов и опасной техники), — до тех пор для мира во всем мире практически не будет надежд.

Наука, культура, философия и государство

Нам кажется, что ближайшей целью в современных условиях является создание такого комитета ученых, который пользовался бы международным авторитетом и мог бы, благодаря этому, направлять всю деятельность науки. В древней цивилизации Египта наука была привилегией правящей верхушки, и только особы царской крови имели право ею заниматься. В Древней Греции (по крайней мере, в ранний период ее истории, т. е. до того, как Платон и Аристотель ввели иную традицию, просуществовавшую целых два тысячелетия) наука была неотделимой частью культуры и философского знания и, как часть единого целого, служила познанию человека. За четыре века последовательных открытий естественных законов Вселенной сделано ничтожно мало для прежнего воссоединения науки и философии.

Действительно, нельзя не противопоставлять земной здравый смысл дохристианской эры с его религиозным восприятием природы и чувством инстинктивного преклонения перед ее грозными силами пассивному и одностороннему взгляду нынешних религиозных сектантов на возможность «конца света», теперь так остро волнующую все мыслящее человечество. Церковные деятели хотя и выдвигают девиз «нужно сначала решить главные проблемы», на практике обращаются к этим острым проблемам лишь в последнюю очередь. Это должно предостеречь ученого-физика, пытающегося уйти от относительной конкретности его собственного материального мира. Ведь на самом деле призывы, кажущиеся результатом мудрого и глубокого знания, часто всего лишь следствие упрямой решимости напуганного человеческого ума перевернуть мир фактов и объективной реальности, назвать черное белым и уйти от раздражающих вопросов в собственный мир фантазий и иллюзий.

Во время шести страшных лет второй мировой войны (когда еще не было атомной бомбы, а оружие массового поражения доставлялось авиацией) уже стало очевидно, как огромен масштаб разрушений по сравнению с ничтожно низкими темпами восстановления. Тем более странно, что эта война, как кажется, лишь способствовала распространению ложного мнения, что якобы этот могущественный потенциал мог бы преобразовать весь мир, если его направить в истинное русло. На самом деле эта точка зрения чревата для мира новыми несчастьями, и, пока не поздно, с нею следует решительно бороться, даже если и знать, что никогда не

грянет новая война. Мир, каким он предстает перед нами, уже столкнулся с истощением ресурсов — как топливных, так и пищевых. Прошлый век мог бы служить итогом всего тысячелетия, но этой возможности нас недемократично лишили, а все остальное — от первого свистка парового двигателя и до мошеннического распределения нечестно нажитых денег и других трюков правительств (на уровне карточных шулеров!) — необратимо вело к войнам и революциям. Теперь, кажется, все понимают, что именно этим неприглядным действиям правительств народы мира обязаны жестокими последствиями.

Как знает каждый ученый, людей провести легко, но природу обмануть невозможно. Поэтому для того, чтобы защитить ученых от растрачивания своих способностей и талантов на изобретение и усовершенствование средств разрушения в военных целях, в не меньшей мере необходимо, чтобы моралисты и церковные деятели переосмыслили понятие истины так, как ее осознали древние греки и люди науки, применяя ее не только к мистическим и трансцендентальным сферам, но и к миру физических величин. Ведь в наши дни наказание за оскорбление божества мирового благополучия — это гораздо более всеобъемлющая катастрофа, чем все те муки ада, которые раньше обещали грешникам за семь смертных грехов. Если этика и религия собираются не препятствовать делу усовершенствования мира, а участвовать по мере своих возможностей в этом процессе, наряду с усилиями экономистов и физиков, то в таком случае им предстоит многое перенять у людей науки, в частности научиться уважать законы природы и следовать им, а не рассматривать эти законы как своих врагов. Им следовало бы также серьезно задуматься над тем, действительно ли их собственные занятия столь недостижимо значимы по сравнению с более мирскими и «низменными» принципами энергии и вещества, благодаря которым люди живут, двигаются и вообще существуют. Как удачно выразился один известный немецкий химик: «Без фосфора нет мысли!»

ХРОНОЛОГИЯ ВАЖНЕЙШИХ ОТКРЫТИЙ В УЧЕНИИ О РАДИОАКТИВНОСТИ

(Составлена Д. Н. Трифоновым, А. Н. Кривомазовым)

- 1896 г., 1 марта — А. Беккерель (во Франции) обнаружил новый тип излучения, испускаемого урановыми солями. Констатация этого факта традиционно рассматривается как открытие явления радиоактивности
- 1896 г., 18 мая — А. Беккерель доказал, что излучение чистого металлического урана значительно интенсивнее излучения урановых солей
- 1897 г., 1 марта — А. Беккерель отметил способность излучения урана разряжать в воздухе наэлектризованные тела, независимо от их потенциала и знака заряда
- 1897 г., 12 апреля — А. Беккерель показал, что активность урановых препаратов практически не уменьшилась за год
- 1897 г. — Э. Вихерт (в Германии) и Дж. Томсон (в Англии) независимо друг от друга открыли электрон
- 1897 г. — Ч. Вильсон (в Англии) изобрел «счетчик пылинки» (так называемая ионизационная камера Вильсона)— важнейший прибор экспериментальной атомной и ядерной физики
- 1898 г. — Г. Шмидт (в Германии) проверил большое число элементов и их соединений и показал, что, помимо урана, радиоактивностью обладает торий и его соединения
- 1898 г. — М. Кюри (во Франции) независимо от Шмидта обнаружила радиоактивность тория и по высокой активности урановых минералов сделала вывод о возможном наличии в них неизвестных радиоактивных элементов
- 1898 г., 18 июля — П. и М. Кюри (во Франции) заявили об открытии полония
- 1898 г., 26 декабря — П. и М. Кюри и Ж. Бемон (во Франции) сообщили об открытии радия
- 1899 г., январь — Э. Резерфорд (в Канаде) обнаружил неоднородность излучения урана: легко поглощаемую часть излучения он назвал α -лучами, менее поглощаемую — β -лучами
- 1899 г. — А. Дебьерн (во Франции), проверяя гипотезу М. Кюри о наличии в урановых минералах новых радиоактивных элементов, выделил смесь высокоактивных радиоэлементов, назвал эту смесь актинием
- 1899 г. — С. Мейер и Э. Швейдлер, а также независимо Ф. Гизель (в Германии) показали способность радиоактивного излучения отклоняться в магнитном поле
- 1900 г. — П. Вийар (во Франции) открыл электромагнитное излучение радиоактивного происхождения — так называемые γ -лучи

- 1900 г. — В. Крукс (в Англии) химическим способом выделил радиоэлемент уран-Х
- 1900 г. — Э. Резерфорд (в Канаде) открыл газообразный радиоэлемент — эманацию тория. Описывая свойства эманации, Резерфорд ввел понятие периода полураспада
- 1900 г. — Э. Дори (в Германии) открыл эманацию радия
- 1901 г. — К. Гоффман и Ф. Гизель (в Германии) независимо открыли радиоэлемент, названный радием (радий-D)
- 1902 г. — М. Кюри (во Франции) определила атомную массу радия равной 225
- 1902 г., сентябрь — Э. Резерфорд и Ф. Содди (в Канаде) открыли торий-Х; они обнаружили, что скорость распада и накопления этого радиоэлемента в урановых минералах одинакова
- 1902 г., ноябрь — Э. Резерфорд и Ф. Содди показали, что эманация радия и эманация тория — инертные газы
- 1902 г. — Ф. Гизель (в Германии) выделил «эманий»; позднее было установлено, что Гизель выделил сравнительно чистый радиоэлемент актиний
- 1903 г., май — Э. Резерфорд и Ф. Содди (в Канаде) сформулировали основы теории радиоактивного распада. Они объединили в первые цепочки распада свыше 10 радиоэлементов
- 1903 г. — А. Дебьерн (во Франции) наблюдал эманацию актиния и радиоэлементы активного осадка актиниевого ряда
- 1903 г. — В. Рамзай и Ф. Содди (в Англии) показали, что одним из продуктов распада эманации радия является гелий
- 1903 г. — П. Кюри и Ж. Данн (во Франции) открыли радиоэлемент радий-В
- 1903 г. — В. Крукс (в Англии) изобрел спинтарископ — прибор для визуального подсчета α -частиц
- 1904 г. — Э. Резерфорд (в Канаде) разработал метод анализа кривых спада активности радиоэлементов активного осадка и открыл короткоживущие радиоэлементы: торий-Б, торий-С, радий-А, радий-В, радий-С, радий-Д, радий-Е, радий-Г, актиний-В, актиний-С, а также предсказал существование актиния-Х и указал его место в ряду актиния
- 1905 г. — Э. Швейдлер (в Австрии) установил статистический характер закона радиоактивных превращений
- 1905 г. — Т. Годлевский (в Канаде) использовал предсказание Резерфорда и открыл актиний-Х
- 1905 г. — О. Ган (в Англии) открыл радиоторий
- 1906 г. — К. Кольрауш (в Австрии) экспериментально обосновал теорию Швейдлера о статистическом характере закона радиоактивного распада
- 1906 г. — Э. Резерфорд (в Канаде) впервые обнаружил явление рассеяния α -частиц
- 1906 г. — О. Ган (в Канаде) открыл радиоактивный
- 1907 г. — О. Ган (в Германии) открыл мезоторий I и мезоторий II
- 1907 г. — Б. Болтвуд (в США) открыл радиоэлемент ионий и показал, что конечным продуктом в радиоактивных рядах должен быть свинец
- 1907 г. — С. Мейер и Э. Швейдлер (в Австрии) открыли радий-Е₂

- 1907 г. — Н. Кемпбелл (в Англии) доказал наличие естественной β -активности у химического элемента калия.
- 1908 г. — О. Ган и Л. Мейтнер (в Германии) открыли радиоэлемент актиний-С'
- 1908 г. — Э. Резерфорд и Г. Гейгер (в Англии) измерили заряд, переносимый α -частицей. Было показано, что α -частица идентична дважды ионизованному атому гелия
- 1909 г. — Д. Стрёмгольм и Т. Сведберг (в Швеции) провели первое систематическое изучение химических свойств радиоэлементов (главным образом долгоживущих). Ученые пришли к выводу, что на каждое место в периодической системе нужно помещать по несколько химически идентичных радиоэлементов (предвосхищение изотопии)
- 1909 г. — Дж. Мак-Леннан (в Канаде) открыл стабильный продукт распада уранового ряда — радий-Г
- 1909 г. — О. Ган и Л. Мейтнер (в Германии) разработали метод радиоактивной отдачи и открыли новый радиоэлемент торий-С''
- 1909 г. — Ф. Содди (в Англии) предложил модель «совместного» распада радиоактивного атома. Такой распад характеризуется несколькими константами (λ_1 , λ_2 и т. д.) и может иллюстрировать предполагаемые радиоактивные вилки
- 1910 г. — В. Рамзай и Р. Витлоу-Грэй (в Англии) точно измерили с помощью уникальных весов атомную массу эманации радия, получив значение 222,5
- 1910 г. — М. Кюри и А. Дебьерн (во Франции) впервые выделили чистый металлический радий
- 1911 г. — К. Фаянс (в Англии) впервые экспериментально доказал существование радиоактивных вилки, открыв существование радиоактивной вилки у радия-С и описав свойства нового радиоэлемента радия-С''
- 1911 г., май — Э. Резерфорд (в Англии) предложил и описал ядерную модель атома
- 1911 г. — Г. Гейгер (в Англии) открыл актиний-А
- 1911 г. — Г. Н. Антонов (в Англии) открыл радиоэлемент уран-У
- 1911 г. — Г. Гейгер и Дж. Неттол (в Англии) обнаружили зависимость между длиной пробега α -частиц и периодом полураспада соответствующего α -излучателя (так называемое соотношение Гейгера — Неттола)
- 1911 г. — Ф. Содди (в Англии) сформулировал α -правило, носящее его имя: при α -распаде валентность продукта изменяется на две единицы
- 1912 г. — Г. Гейгер и Дж. Неттол (в Англии) измерили $T_{1/2}$ урана-III и показали, что содержание этого радиоэлемента в естественной смеси с ураном весьма незначительно
- 1912 г. — К. Фаянс (в Германии) открыл радий-С' с периодом полураспада 10^{-6} сек (вычислено с помощью соотношения Гейгера — Неттола)
- 1913 г., январь — А. ван ден Брук (в Голландии) выдвинул идею, что порядковый номер элемента в периодической системе равен заряду ядра его атомов
- 1913 г., январь—февраль — Г. Хевеши (в Англии), А. С. Рассел (в Англии), К. Фаянс (в Германии) и Ф. Содди (в Англии) независимо друг от друга сформулировали правила радиоактивных смещений и разместили радиоэле-

- менты трех радиоактивных рядов в периодической системе. Приоритет в формулировке правил смещений принадлежит К. Фаянсу
- 1913 г. — А. Флек (в Англии) провел систематическое изучение химической неотделимости большинства известных радиоэлементов
- 1913 г. — К. Фаянс и О. Гёринг (в Германии) открыли уран- X_2 , химические свойства которого были предсказаны на основе правил радиоактивных смещений
- 1913 г. — К. Фаянс (в Германии) впервые проанализировал связь между типом распада, периодом полураспада и массовым числом у радиоэлементов одной плеяды (изотопов)
- 1913 г. — Н. Бор (в Дании) сформулировал два основных постулата теории атома: 1) условие существования стационарных состояний атома и 2) условие частот излучения. За основу он принял ядерную модель атома Резерфорда и предположил, что процесс излучения по своему характеру квантовый
- 1913 г. — Э. Марсден и Р. Вильсон (в Англии) открыли радиоактивную вилку в ряду тория у тория-С и по соотношению Гейгера — Неттола вычислили $T_{1/2}$ неизвестного радиоэлемента тория-С'' (равен 10^{-11} сек)
- 1913 г., 4 декабря — Ф. Содди (в Англии) сформулировал закон радиоактивных смещений и ввел в науку концепцию изотопии
- 1913 г., декабрь — Г. Мозли (в Англии) на примере элементов от кальция до никеля показал, что заряд ядра атомов этих элементов равен их порядковому номеру в периодической системе элементов Д. И. Менделеева
- 1914 г. — Э. Марсден (в Англии) обнаружил, что быстрые α -частицы при прохождении через водород и водородсодержащие вещества выбивают быстрые частицы с большой длиной пробега; эти частицы были отождествлены с ядрами водорода
- 1915 г., декабрь — К. Фаянс (в Германии) обобщил исследования радиоэлементов. Он впервые замкнул радиоактивные вилки на D-продуктах и предсказал существование двух радиоэлементов перед актинием в актиниевом ряду
- 1916 г. — А. Зоммерфельд (в Германии) завершил цикл теоретических исследований, представляющих собой дальнейшее развитие первоначальной теории Бора
- 1916 г. — Т. Ричардс и Ч. Уордсворт (в США) измерили атомные массы свинца из различных урансодержащих минералов и доказали, что они всегда меньше атомной массы обычного свинца
- 1917 г. — В. Гаркинс (в США) выдвинул идею ядерной периодичности
- 1917 г. — Ф. Содди (в Англии) впервые высказал гипотезу о возможном существовании «изотопов высшего порядка», которые были открыты позднее и названы изомерами
- 1918 г. — Н. Бор (в Дании) выдвинул принцип соответствия
- 1918 г. — Ф. Содди и А. Крэнстон (в Англии), а также О. Ган и Л. Мейтнер (в Германии) независимо открыли новый долгоживущий α -излучатель в ряду актиния, который был назван протактинием
- 1918 г. — Э. Резерфорд (в Англии) начал публиковать серию

- работ, посвященных изучению столкновения α -частиц с атомами легких газов и описывающих искусственное превращение ядер, их расщепление
- 1920 г. — Г. Хевеши и В. Цехмайстер (в Австрии) впервые наблюдали явление изотопного обмена
- 1920 г. — Э. Резерфорд (в Англии) в своей второй Бейкерманской лекции высказал предположение о существовании нейтрона и тяжелого изотопа водорода
- 1920 г. — Дж. Чедвик (в Англии) осуществил проверку вывода Г. Мозли о том, что заряд ядра точно равен порядковому номеру элемента (на примере меди, серебра и платины)
- 1920 г. — В. Гаркинс (в США) вывел формулы и привел таблицы состава ядер легких (до кобальта) и радиоактивных элементов. Он предложил новую классификацию ядер: четно-четные, четно-нечетные и т. д.
- 1921 г. — Л. Мейтнер (в Германии) предложила модель строения атомных ядер из α -частиц, протонов и электронов
- О. Ган (в Германии) открыл явление ядерной изомерии на примере природного радиоактивного изотопа ^{234}Pa
- 1924 г. — Э. Резерфорд опубликовал работу «Естественное и искусственное разложение элементов», в которой обобщил исследования по расщеплению ядер α -частицами
- 1925 г. — П. Блэккетт (в Англии) впервые экспериментально установил механизм расщепления ядер α -частицами
- 1926 г. — Г. Петтерсон и Г. Кирш (в Австрии) опубликовали работу «Разбивание атома», в которой детально обсудили проблему искусственного превращения элементов
- 1928 г. — Г. Гамов (в Англии), Р. Генри и Е. Кондон (в США) выдвинули квантовомеханическую теорию α -распада и ввели понятие о туннельном эффекте
- 1930 г. — Ф. Разетти (в Италии) установил, что ядро азота характеризуется целым (1), а не дробным ($1/2$) значением спина, чем опровергалась протон-электронная модель строения ядра
- П. Дирак (в Англии) предсказал существование позитрона
- В. Паули (в Швейцарии) высказал идею о существовании нейтральной частицы с массой порядка массы электрона (предсказание нейтрино)
- 1931 г. — Ч. Андерсон (в США) наблюдал в космическом излучении частицу, аналогичную электрону, но несущую положительный заряд
- 1932 г. — Д. Чедвик (в Англии) открыл нейтрон
- Д. Д. Иваненко, Е. Н. Гапон (в СССР) и В. Гейзенберг (в Германии) предложили протон-нейтронную модель ядра
- Г. Юри, Ф. Брикведде и Г. Мэрфи (в США) открыли дейтерий
- 1933 г. — П. Блэккетт и Г. Оккиалини (в Англии) открыли позитрон
- В. Паули (в Бельгии) четко сформулировал гипотезу о нейтрино
- 1933 г. — Г. Льюис и Р. Макдональд (в США) получили тяжелую воду

- 1934 г.
- И. и Ф. Жолио-Кюри (во Франции) открыли явление искусственной радиоактивности и наблюдали новый вид радиоактивных превращений — позитронный, или β^+ -распад
 - Э. Ферми (в Италии) разработал теорию β -распада
 - Э. Ферми предположил, что в результате β^- -распада урана, облученного медленными нейтронами, могут образовываться изотопы трансурановых элементов
 - И. Ноддак (в Германии) предсказала возможность деления ядер урана на несколько больших осколков (предвидение явления деления ядер)
 - И. Маттаух (в Германии) сформулировал правило нестабильности изобар
 - К. Гуггенхеймер и В. Эльзассер (во Франции), И. П. Селинов (в СССР) ввели представления о «магических» числах протонов и нейтронов в ядрах
- 1934 г.
- Л. Сциллард (в Англии) высказал идею о возможности осуществления цепной ядерной реакции: ${}^9_2\text{He} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{236}_{92}\text{U} \rightarrow 2\text{He} + \dots$, при которой при захвате одного нейтрона выделяются два и освобождается энергия
 - М. Олифант, П. Хартек и Э. Резерфорд (в Англии) открыли тритий
- 1935 г.
- И. В. Курчатов с сотр. (в СССР) обнаружили явление ядерной изомерии у искусственного радиоактивного изотопа ${}^{90}\text{Br}$
 - М. Гёпперт-Майер (в США) высказала предположение о возможности двойного β -распада
 - А. Демпстер (в США) на масс-спектрографе доказал существование изотопа уран-235 (актиноурана)
 - Г. Боте (в Германии) предложил общепринятую ныне схему записи уравнений ядерных реакций: $A(x, y)B$.
 - Х. Юкава и Ш. Сахата (в Японии) предсказали возможность захвата ядром электрона с внутренней оболочки атома
 - И. Е. Тамм (в СССР) и Х. Юкава (в Японии) высказали гипотезу о сущности ядерных сил
- 1936 г.
- Н. Бор (в Дании) теоретически обосновал модель составного ядра, объясняющую механизм ядерных реакций
 - К. Вайцеккер (в Германии) предложил объяснение ядерной изомерии
- 1937 г.
- Н. Бор и Ф. Калькар (в Дании) развили представление о капельной модели ядра
- 1937 г.
- К. Перье и Э. Сегре (в Италии) открыли первый синтезированный элемент — технеций
- 1938 г.
- М. Пул и Л. Квилл (в США) осуществили попытку искусственного синтеза элемента с $Z=61$
 - Л. Альварец (в США) экспериментально доказал явление захвата ядром электрона из K -оболочки (K -захват)
 - О. Ган и Ф. Штрассман (в Германии) открыли явление деления урана медленными нейтронами
- 1939 г.
- Л. Мейтнер и О. Фриш (в Швеции) дали объяснение механизма деления ядра урана
 - М. Перей (во Франции) открыла франций ($Z=87$) в природных радиоактивных минералах
- 1939 г.
- Н. Бор (в США) и Я. И. Френкель (в СССР) развили теорию деления ядер

- 1939 г. — Р. Робертс, Р. Мейер и П. Вонг (в США) обнаружили испускание запаздывающих нейтронов
 — Ф. Перрен (во Франции) ввел понятие критической массы
- Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон (в СССР) теоретически исследовали цепную реакцию деления урана на быстрых нейтронах
 — А. Нир (в США) на масс-спектрографе доказал существование изотопа уран-234 (уран II)
- 1940 г. — К. А. Петржак и Г. Н. Флёров (в СССР) обнаружили явление спонтанного деления урана
 — Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон (в СССР) теоретически исследовали цепную реакцию деления урана медленными нейтронами и сформулировали условия ядерного взрыва
 — Д. Корсон, К. Маккензи и Э. Сегре (в США) синтезировали астат ($Z=85$)
- 1940 г. — Е. Макмиллан и П. Абельсон (в США) синтезировали нептуний — первый трансурановый элемент
 Г. Сиборг с сотр. (в США) синтезировали плутоний
 — Г. Альварец (в США) получил на ускорителе поток многозарядных ионов C^{6+} с энергией 50 Мэв
 — А. Нир (в США) осуществил разделение урана-235 и урана-238 в заметных количествах и показал, что делению медленными нейтронами подвергается уран-235
- 1941 г. — Г. Лоу, М. Пул, Д. Курбатов и Л. Квилл (в США) сообщили о синтезе изотопов элемента 61 с массовыми числами 144, 147, 149
 — Г. Сиборг с сотр. (в США) синтезировали плутоний-239
- 1942 г. — Б. Кеннигем и Л. Вернер (в США) впервые выделили весовые количества чистого плутония
- 1943 г. — Б. Карлик и Т. Бернерт (в Австрии) обнаружили природный астат
- 1944 г. — Г. Сиборг с сотр. (в США) синтезировали кюрий
- 1945 г. — Г. Сиборг с сотр. (в США) синтезировали америций
 — Д. Маринский, Л. Гленденин и Ч. Кориэлл (в США) из осколков деления урана выделили прометий ($Z=61$)
- 1948 г. — Г. Сиборг и И. Перлман (в США) обнаружили природный плутоний
- 1949 г. — Г. Сиборг с сотр. (в США) синтезировали берклий
 — М. Гёпперт-Майер (в США) теоретически обосновала оболочечную модель ядра и значения «магических» чисел
 — Е. Финберг (в США) ввел понятие об «островках» изомерии
- 1950 г. — Г. Сиборг с сотр. (в США) синтезировали калифорний
 — Г. Сиборг и А. Гиорсо с сотр. (в США) реконструировали структуру вымершего радиоактивного семейства $4n+1$, начинающегося ^{237}Np и заканчивающегося ^{208}Bi
- 1951 г. — Б. С. Джелепов (в СССР) высказал предположение о возможности протонной радиоактивности у нейтронodefицитных ядер легких элементов
- 1952 г. — Г. Сиборг и А. Гиорсо с сотр. (в США) в образцах, собранных после термоядерного взрыва, обнаружили изотопы эйнштейния и фермия

- 1952 г. Д. Пеппард с сотр. (в США) обнаружили природный нептуний
— П. Мерилл (в США) обнаружил линии технеция в спектрах некоторых звезд
- 1953 г. — Д. Расмуссен, С. Томпсон и А. Гиорсо (в США) открыли несколько α -излучателей среди изотопов с $Z < 83$
- 1955 г. — Г. Сиборг с сотр. (в США) синтезировали менделевий
- 1956 г. — Ч. Коуэн с сотр. (в США) экспериментально обнаружили нейтрино
- 1957 г. — В Нобелевском институте (Швеция) предпринята неудачная попытка синтеза элемента с $Z=102$
- 1958 г. — Г. Н. Флёров с сотр. (в СССР) сообщили о синтезе элемента с $Z=102$
— В. А. Карнаухов (в СССР) оценил границы стабильности ядер (до $Z=70$) по отношению к протонной радиоактивности и предсказал возможные протонно-активные ядра (^{39}Sc , ^{62}As , ^{106}Sb)
- 1959 г. — П. Е. Спивак с сотр. (в СССР) определили период полураспада свободного нейтрона
— А. Гиорсо с сотр. (в США) сообщили о синтезе элемента с $Z=102$
- 1960 г. — В. И. Гольданский (в СССР) предсказал возможность двупротонной радиоактивности — одновременного испускания ядер двух протонов
- 1961 г. — Б. Кенна и П. Курода (в США) обнаружили природный технеций
- 1961 г. — А. Гиорсо с сотр. (в США) объявили о синтезе лоренсия
- 1962 г. — В. А. Карнаухов с сотр. (в СССР) обнаружили явление испускания запаздывающих протонов
— Г. И. Флёров с сотр. (в СССР) открыли явление спонтанного деления ядер в изомерном состоянии
- 1964 г. — Г. Н. Флёров с сотр. (в СССР) синтезировали курчатовий
- 1965 г. — Е. Д. Донец, В. А. Щеголев и В. А. Ермаков (в СССР) осуществили синтез изотопа $^{268}103$
- 1966 г. — И. Звара с сотр. (в СССР) осуществили химическую идентификацию курчатовия
- 1967 г. — Г. Н. Флёров с сотр. (в СССР) провели предварительные эксперименты по синтезу элемента с $Z=105$
— Г. Н. Флёров (в СССР) высказал идею, что перспективным методом синтеза новых элементов может явиться деление сверхтяжелых составных ядер
- 1968 г. — П. Курода и Б. Кенна (в США) обнаружили природный прометий
- 1969 г. — Г. Н. Флёров с сотр. (в СССР) синтезировали нильсборий
— А. Гиорсо сообщил о первом синтезе в США элемента с $Z=104$
- 1970 г. — И. Звара с сотр. (в СССР) осуществили химическую идентификацию нильсбория
— А. Гиорсо с сотр. сообщили о синтезе элемента с $Z=105$
— Дж. Черны с сотр. (в США) экспериментально обнаружили протонную активность у изомера ^{53m}Co
- 1971 г. — П. Диттнер с сотр. (в США) идентифицировали атомы элемента с $Z=102$ посредством измерения рентгеновского излучения в соответствии с законом Мозли

- 1971 г. — Д. Хоффман с сотр. (в США) обнаружили в природе первичный плутоний-244
 — В. И. Гольданский и Л. К. Пекер (в СССР) предсказали новый вид радиоактивных превращений — двунейтронный распад
 — Н. К. Скобелев (в СССР) описал экспериментально обнаруженное запаздывающее деление, происходящее после β -распада
- 1973 г. — Ч. Бемис с сотр. (в США) по измерению рентгеновского излучения идентифицировали один из изотопов элемента с $Z=104$
- 1974 г. — Ю. Ц. Оганесян с сотр. (в СССР) осуществили синтез элемента с $Z=106$
- 1975 г. — Ю. Ц. Оганесян с сотр. (в СССР) синтезировали элемент с $Z=107$

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

(Составлен Д. Н. Трифоновым, А. Н. Кривомазовым)

- Льюцци М. История физики. Пер. с итал., М., «Мир», 1970.
 Джуа М. История химии. Пер. с итал., М., «Мир», 1966.
 Кудрявцев П. С. Курс истории физики. М., «Просвещение», 1974.
 Глессстон С. Атом. Атомное ядро. Атомная энергия. Развитие современных представлений об атоме и атомной энергии. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
 Трифонов Д. Н., Кривомазов А. Н., Лисневский Ю. И. Учение о периодичности и учение о радиоактивности. Комментированная хронология важнейших событий. М., Атомиздат, 1974.
 Гольдшмидт Б. Атомная проблема. Политические и технические аспекты. М., Атомиздат, 1964.
 Рузе М. Роберт Оппенгеймер и атомная бомба. М., Атомиздат, 1965.
 Лоуренс У. Л. Люди и атомы. М., Атомиздат, 1966.

КНИГИ О ЖИЗНИ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ФРЕДЕРИКА СОДДИ

- Вяльцев А. Н., Кривомазов А. Н., Трифонов Д. Н. Правило сдвига и явление изотопии. М., Атомиздат, 1976.
 Кривомазов А. Н. Фредерик Содди. 1877—1956. М., «Наука», 1978.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редакторов перевода	5
Предисловие	21
Предисловие к изданию 1954 года	23
Глава первая. ОТ АЛХИМИИ К ХИМИИ	25
<i>(Цель данной книги. — Происхождение химии. — Химия в древности. — Возникновение экспериментальных наук)</i> Глава вторая. СОВРЕМЕННАЯ АТОМНАЯ И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ТЕОРИИ	44
<i>(Атом и молекула. — Подлинное появление атомной теории. — Дальтон и атомная теория. — Работа Вильяма Хиггинса. — Молекулярная теория. — Атомная теория Берцелиуса. — Периодическая система химических элементов. — Спиральная форма периодического закона)</i> Глава третья. ЭНЕРГИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВО	70
<i>(Тепло. — Законы термодинамики. — Кинетическая теория газов. — Броуновское движение и число Авогадро. — Современное представление о молекуле. — Электричество. — Теория электролитической диссоциации Аррениуса. — Электромагнитная теория света. — Спектральный анализ. — «Лучевая материя»)</i> Глава четвертая. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, РАДИОАКТИВНОСТЬ И ЭЛЕКТРОН	90
<i>(Социальная значимость энергии. — Рентгеновское излучение и электрон. — Радиоактивность. — Новые радиоактивные элементы. — Радий. — Ионизация газов. — Альфа-, бета- и гамма-излучение. — Эманации и активные осадки)</i> Глава пятая. ОТКРЫТИЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ	105
<i>(Монреаль и Резерфорд. — Эманация — это инертный газ — Торий-Х и уран-Х. — Теория радиоактивного распада. — Гелий и радиоактивность. — Возраст Земли. — Альфа-излучение. — Образование гелия из радия. — Радиоактивное равновесие. — Материнские вещества полония, актиния и радия. — Исследование Бреггом природы альфа-излучения. — Альфа-частица — это испускаемое ядро гелия)</i>	

Глава шестая. ЭНЕРГИЯ И МАССА. ИЗОТОПЫ 131
(Электромагнитная теория массы. — Теория относительности. — Внутренняя энергия массы. — Эквивалентность массы и энергии. — Происхождение концепции изотопов. — Радиоторий. — Мезоторий. — Анализ продуктов распада. — Закон радиоактивных смещений. — Интерпретация периодического закона. — Исключения из периодического закона. — Предсказания на основе закона радиоактивных смещений. — Материнское вещество актиния. Протактиний. — Изотопы свинца)

Глава седьмая. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ И ЯДЕРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА 149
(Квантовая теория. — Действие. — Атом действия. — *Quanta* и «кванты». — Модель атома Томсона. — Открытие атомного ядра. — Атом Резерфорда—Бора. — Спектральные серии. — Теория оптических спектров Бора. — Соотношение между двумя частотами. — Простой вывод формулы спектральной серии. — Постоянная Ридберга. — Дилемма физики)

Глава восьмая. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ И ХИМИЯ 164
(Дифракция рентгеновского излучения. — Баркла. — Закон Мозли. — Гафний и рений. — Общие аспекты теории атомного ядра. — Статическая модель атома или кубический атом. — Полярные соединения. — Неполарные соединения. — Молекулярные соединения и соединения Вернера. — Периодический закон как следствие атомизации электричества и действия. — Принцип неопределенностей. — Нулевая энергия. — Невероятен ли покой?)

Глава девятая. НА ПУТИ К ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ПЕРВОГО ИСКУССТВЕННОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ 185
(Методы регистрации единичного распада. — Методы усиления. — Атомное ядро и астрономия. — Испускаемые протоны. — Расщепление ядер легких элементов альфа-частицами. — Электронвольт. — Исследования Астона в области изотопов. — Четные и нечетные элементы. — Возрождение гипотезы Праута. — Коэффициент Астона. — Первая искусственная трансмутация. — Расщепление ядра лития. — Выделение энергии из лития)

Глава десятая. НОВЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОТКРЫТИЯ И МЕТОДЫ 214
(Чудесный год радиоактивности. — Электронная пара. — Расщепление фотона. — Нейтрон. — Новое ядро. — Тяже-

лый водород. — Полосатые спектры изотопов. — Свойства тяжелой воды. — Водород и энергия при абсолютном нуле. — Система записи ядерных реакций. — Искусственная радиоактивность. — Электротехника высокого напряжения. — Циклотрон. — Превращения, осуществленные на циклотроне. — Искусственное получение радиоэлементов. — Нейтрон в роли агента превращений)

Глава одиннадцатая. НА ПУТИ К ДЕЛЕНИЮ АТОМА 233

(Всевозрастающая сложность. — Появление простоты. — Соотношение чисел нейтронов и протонов. — Область стабильности ядер. — Ядерная химия. — Космическое излучение. — Ливни или вспышки космического излучения. — Мезон. — Ядерное деление радиоэлементов. — Продукты деления и их энергия отдачи. — Испускание нейтронов. — Деление урана. — Актиниуранил или уран-235)

Глава двенадцатая. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕВРАЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ 248

(Две цели. — Военная цель. — Мирная цель. — Замедлитель. — Урановый реактор. — Установки в Клинтоне и Ханфорде. — Величайшее достижение в истории человечества. — «Томная» и «атомная» энергия. — Условия «томной» детонации. — «Томная» бомба. — Разделение изотопов урана. — Электромагнитное разделение. — Трансурановые элементы. — Плутоний. — «Отравление» уранового реактора. — США имели всего три бомбы. — Периодический закон в новом освещении. — Нептуний)

Глава тринадцатая. БУДУЩЕЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ 264

(Предварительные итоги. — Социальная ответственность ученого. — Естественные источники урана. — Зачем впустую растрчивать уран? — Интенсивность и количество в энергетике. — Нераскрытые возможности. — Новые виды излучений и мутации. — Правильное использование новых знаний. — Рабочий пример международной науки. — Наука и общество. — Полное уничтожение войны. — Наука, культура, философия и государство)

Хронология важнейших открытий в учении о радиоактивности (Составлена Д. Н. Трифоновым, А. Н. Кривомазовым) 276

Список рекомендуемой литературы (Составлен Д. Н. Трифоновым, А. Н. Кривомазовым) 284

ИБ № 721

Фредерик Содди
История атомной энергии

Редактор *Э. Д. Андреевко*
Художественный редактор *А. Т. Кирьянов*
Обложка художника *Е. А. Сумнительного*
Технический редактор *О. Н. Адашкина*
Корректор *Н. А. Музыкантова*

Сдано в набор 27.12.78. Подписано к печати 09.07.79. Формат 70×100¹/₃₂. Бумага кн.-журн. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 11,61. Уч.-изд. л. 18,08. Тираж 52 000 экз. Зак. изд. 76494. Зак. тип. 4. Цена 95 к.

Атомиздат. 103031 Москва К-31,
ул. Жданова, 5.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014 Ярославль, ул. Свободы, 97.