

53
B-16

B165

У

Вальтер

АТАКА АТОМНОГО
ЯДРА.

СР. В. Д. Д. Д.
1958 г.

-4014-

V

5

4014

7



9/2

40/4

✓

I. ЗНАЧЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДРА

Физики всего
мира изучают
строение ядра

Вряд ли в истории физики можно указать еще на одну проблему, над которой работали бы столь же крупные силы мировой науки, которая столь же занимала бы их, как проблема атомного ядра.

Эта проблема может быть смело названа центральной, и с каждым годом, по мере приближения к ее разрешению, по мере получения новых результатов, проливающих свет на загадку строения ядра, она становится все более глубокой, все более захватывающей, и к работе над ней привлекаются все более и более широкие слои исследователей, она становится ведущей, стержневой проблемой тематики все новых и новых институтов. Трудно даже перечислить все научно-исследовательские ячейки и всех исследователей, занятых разрешением вопросов, прямо или косвенно касающихся проблемы строения ядра: число первых измеряется многими десятками, а вторых — сотнями.

Можно уже говорить о целых школах, о сильных научно-исследовательских группах, целеустремленно работающих в этой отрасли; даже таких насчитывается не мало: в Англии — школа Резерфорда (Кембридж), насчитывающая ряд авторитетнейших специалистов, как Резерфорд, Чадвик, Эллис, Кокрофт и др., и около тридцати лет упорной и плодотворной работы; в Америке — Лауренс, Ливингстон и др. (Калифорнийский университет) и ван-Грааф (Принстон); во Франции — школа Кюри; в Австрии — Петерсен и Кирш (Вена); в Германии — даже ряд „школ“ — Мейтнер (Берлинский институт университета), Боте, Браш и Ланге (исследовательский институт фирмы АЕГ) и др.

В дореволюционной России исследованием атомного ядра не занимались вовсе, да, впрочем, и о „русской“ физике в ту эпоху говорить не приходится, так как она югилась в двух-трех университетских кафедрах и подбирала крохи западно-европейской научной мысли. За шестнадцать лет существования Советского Союза наша физика не только окрепла и выросла, но, опираясь на мощную материальную базу в виде сети научно-исследовательских институтов, в которых работают с большевистским упорством и энтузиазмом тысячи молодых наших специалистов, решительно вышла на одно из первых мест, обогнав ряд евро-

пейских стран, в том числе скандинавские страны и Францию, и став примерно на четвертое место (после Германии, Англии и Америки).

Исследование атомного ядра в СССР

При бурном росте и укреплении физики Советского Союза центральная проблема — физика ядра — естественно не могла не занять места в тематике наших институтов. И, действительно, здесь физики СССР уже имеют за собой довольно крупные достижения. Достаточно указать теоретические исследования молодого ленинградского физика Гамова, который первый в мире сделал крупный шаг к разработке теории строения ядра; экспериментальные исследования Скобельцына (Ленинград) и др. Однако до 1930 г. у нас не было ни одной лаборатории, ни одного института, целеустремленно посвятившего себя, подобно Кевендишскому институту Резерфорда, проблеме ядра. Вместе с тем советская физика, социалистическая физика должна завоевать первенство в разрешении проблемы международно-исторического значения, должна занять первое место среди передовых стран, научные силы которых брошены на штурм ядра.

Учитывая это, молодой Украинский физико-технический институт (УФТИ) в Харькове, выйдя из периода организации и освоения оборудования, переключил свои лучшие силы на разрешение этой проблемы, выделив сильную бригаду в составе до двадцати человек и крупные средства на работы по исследованию ядра, и закрепил эту тему как стержневую в тематическом плане института на вторую пятилетку. Работа этой бригады уже дала ряд крупных достижений; темпы и качество ее не оставляют сомнения в том, что путь, пройденный крупнейшими лабораториями Запада и Америки, будет совершен ею в более короткий срок, и, при наличии правильной организации труда и молодого энтузиазма ее участников, бригада УФТИ станет одной из ведущих лабораторий мира.

Открытия 1932 г. Не даром вокруг атомного ядра напряженно работали десятки лабораторий и сотни исследователей. После десятилетий упорной, неблагодарной, кропотливой работы, которая год за годом давала новые сведения о строении ядра, но давала их настолько скупо, что трудно было заметить приближение к конечной цели, — 1932 г. был ознаменован рядом крупнейших открытий, которые по праву принадлежали школе Резерфорда, наиболее сильной научно-исследовательской группе, работающей в области ядра. Эти открытия, до известной степени, опрокинули установившиеся до сего времени представления о строении ядра, и результаты их еще покуда трудно оценить. Можно только сказать, что в исследовании ядра произошел решительный сдвиг, скачок, что открытия 1932 г. послужат тем трамплином, с которого научное исследование сможет сделать еще более решительный прыжок в

тайники самой существенной, самой основной и вместе с тем самой трудно достижимой части атома. Когда мы в следующей главе, более подробно познакомимся с основами строения атома, нам легче будет оценить смысл и значение открытий, о которых идет речь; однако и здесь уже можно сказать, в чем они заключаются. Это:

1) установление Чадвиком испускания ядрами атомов особых до сего времени совершенно неизвестных, нейтральных, т. е. незаряженных, частиц нейтронов, которые, очевидно, входят в состав атомного ядра и о существовании которых до сих пор ничего не было известно;

2) достигнутое Кокрофтом и Уолтоном расщепление ядер ряда элементов, вызванное ударом заряженных атомов водорода, предварительно ускоренных в разрядной трубке действием высокого постоянного напряжения;

3) открытые Андерсоном и Блэккетом „ядерные“ взрывы, сопровождающиеся выделением громадной энергии и испусканием неизвестных до сих пор частиц — позитронов.

Однако, прежде чем рассматривать всю важность и значение именно этих результатов, нам необходимо разобраться в том, почему же исследование атомного ядра является столь актуальным, почему эта задача заняла центральное место в физике, что может дать разгадка строения атомного ядра и в чем заключается его загадка.

Атомистическая теория, представляющая все тело в природе не сплошными, а состоящими из отдельных мельчайших частиц атомов и молекул, — в течение многих лет уже может считаться не догадкой, не гипотезой, а столь же верным отражением действительности, как представление о шаровидной форме земли или о том, что земля и другие планеты обращаются вокруг солнца. Миллионы всевозможных экспериментов, проведенных исследователями (преимущественно физиками и химиками), с момента зарождения этих наук и до сего времени не дают ни одного результата, противоречащего этой теории. Ее достоверность не многим меньше достоверности того утверждения, что Солнце взойдет сегодня так же, как и вчера, хотя последнее подтверждено наблюдениями всего человечества, во всяком случае со времени зарождения письменности.

Все бесчисленное множество различных веществ, окружающих нас, состоит из относительно небольшого количества (92) элементов; атомы этих элементов, соединяясь между собой в различных комбинациях, дают более сложные частицы — молекулы, из которых построены окружающие нас тела. В середине прошлого столетия этим и ограничивались представления о строении вещества. Оставалось неясным, чем различаются атомы 92 сортов, почему они связываются в совершенно определенных комбинациях в молекулы, какие силы сдерживают атомы

в молекуле, и, кроме того, в этой картине строения вещества не оставалось места для электричества: электричество представлялось какой-то особой „невесомой“ жидкостью, которая может заполнять „поры“ между отдельными атомами, но не участвует в них в виде составной части. Конец девятнадцатого века был ознаменован большими сдвигами в развитии представлений о строении вещества. Основным из них было открытие атомной структуры (строения) электричества. На сцену появляется электрон — элементарный электрический заряд — атом электричества. Устанавливается его масса (вес), величина заряда, и электрон завоевывает почетное место, как „кирпич мироздания“ — одна из составных частей, из которых построен атом. Около 1912 г. получает право гражданства модель (т. е. наглядный образец) строения атома, которая, правда, претерпев за последние годы немаловажные изменения, все же сохраняет самые основные черты и в современных представлениях о строении атома. Согласно этой модели (ее творцами были Резерфорд и Бор),¹ всякий атом состоит из положительно заряженного ядра, окруженного оболочкой отрицательно заряженных электронов. При „нормальных условиях“, т. е. когда атом не подвергается сильному воздействию извне, — положительный заряд ядра равен отрицательному заряду оболочки, так что весь атом в целом нейтрален, т. е. как бы не обладает электрическим зарядом. Различные сорта атомов отличаются величиной заряда ядра или, что то же, числом электронов в его оболочке, при чем самый простой атом водорода обладает всего 1 электроном в „оболочке“; самый сложный — атом урана — 92 электронами. Таким образом, в атоме намечаются две части: периферическая, внешняя, представляющая рой отрицательно заряженных электронов, обращающихся вокруг ядра, и внутренняя, положительно заряженная часть — самое ядро атома.

Периферические свойства атомов Периферическая часть атома является наиболее доступной для всякого воздействия, и даже без особенно мощных средств в ней можно вызвать различные изменения. Можно привести несколько типов таких изменений, которые часто случаются в жизни атомов и обуславливают очень многие его свойства. Одним из типичных изменений такого рода является возбуждение атома.

Возбуждение атома О том, что такое возбуждение, можно себе составить весьма грубое, но довольно наглядное представление на следующем примере. Представьте себе довольно туго натянутую струну. Оттянув ее, а

¹ Первая модель атома с электронами предложена Томсоном. Согласно этой модели, атом представляет собой равномерно наэлектризованный положительно электричеством шар, внутри которого неподвижно покоятся электроны. Эта модель позволила в грубых чертах объяснить ряд атомных свойств, в частности испускание света атомами и действие магнитного поля на излучение атомов (эффект Зеемана); но ее пришлось оставить после опытов Резерфорда с рассеянием α -частиц при прохождении через материю (об этом см. ниже).

затем отпустив, мы замечаем, что струна приходит в колебательное движение, при чем слышен постепенно ослабевающий звук; чем сильнее натяжение струны, тем этот звук выше. Работа, которую мы потратили на растяжение струны, перешла в ее дрожание — в звук, который „излучается“ в окружающее пространство.

Нечто подобное можно проделать и с атомом: „оттянув“ один из электронов оболочки (этого, конечно, нельзя сделать руками или каким-либо инструментом, но лишь ударом другого атома или электрона, или путем „раскачивания“ атома светом), мы приводим атом в возбужденное состояние, подобно натянутой струне. Роль упругих сил, развивающихся в струне, играют здесь силы притяжения между положительным ядром и отрицательным электроном. Электрон, „соскакивая“ в свое первоначальное состояние, „излучает“ избыточную энергию в виде света, при чем частота этого света (аналогично высоте звука в случае струны) будет зависеть от прочности связи данного электрона с ядром, от работы, которая была затрачена на „оттягивание электрона“, — на возбуждение атома.

Излучение и поглощение света атомами, т. е. оптические их свойства, оказываются, таким образом, тесно связанными с тем, как построены их электронные оболочки и каковы силы, притягивающие электрон к ядру.

Электронная теория атома очерпнула мощную поддержку в изучении оптических свойств атома и, с другой стороны, помогла разобраться в этих оптических свойствах. Можно смело сказать, что было бы невозможно понять всю сложную и разнообразную область этих оптических свойств без наших современных представлений о строении оболочки атома. Спектральный анализ, т. е. определение состава вещества по испускаемому и поглощаемому им свету, который дал в руки химика самый чувствительный метод для обнаружения ничтожных количеств примесей в исследуемых соединениях, — целиком обязан нашим представлениям об электронной оболочке и ее строении. Спектральный анализ позволяет с величайшей достоверностью говорить о составе звезд, расширяя область исследования химика, раздвигая стены его лаборатории на миллиарды миллиардов километров, — делая объектом точного исследования мира отдаленных уголков вселенной, пылающие солнца которых кажутся нам мерцающими звездочками.

Однако оптическими свойствами далеко не исчерпывается та область, которая развилась, получила объяснение и обоснование в наших представлениях об оболочке атома.

По мере того, как атом подвергается все более и более мощным внешним воздействиям (например, при увеличении скорости, а следовательно, и силы удара попадающей в него „пули“ — электрона или другого атома), появляется возможность возбуждения

Ультрафиолетовые и рентгеновые лучи

на или другого атома), появляется возможность возбуждения

все более и более прочно связанных с ядром электронов, расположенных во внутренних слоях оболочки, а следовательно, возрастает и частота света, который испускается атомами, когда электрон вновь „проваливается“ на свое прежнее место.

Наш глаз в состоянии ощущать только очень маленькую область „света“, именно такой свет, частота которого лежит между 4×10^{14} (четыреста тысяч миллиардов) колебаний в секунду — „красный“ свет и 8×10^{14} (восемьсот тысяч миллиардов) колебаний в секунду — „фиолетовый“ свет. Электромагнитные колебания с большей и меньшей частотой, которые по существу представляют собой то же явление, что и свет, нашим глазом не воспринимаются, и поэтому о них можно говорить как о „невидимом свете“, который, однако, прекрасно чувствуется фотопластинкой и другими методами, доступными современному исследователю. Излучение видимого света — результат возбуждения самых слабо связанных с ядром (оптических) электронов. Возбуждение более глубоких (более прочно связанных) электронов дает излучение „более высокочастотного“, уже невидимого света, который носит название ультрафиолетового и который за последнее время получает все более и более широкое распространение в медицине („горное солнце“), технике (браковка различных окрашенных изделий — по степени отражения ими ультрафиолетового света), сельском хозяйстве (повышение всхожести семян облучением ультрафиолетовыми лучами) и даже в технике судебной экспертизы (обнаружение подлогов).

Еще более мощное „расшатывание“ атома вызывает возбуждение еще более „прочных“ электронов и излучение еще более высокочастотного, коротковолнового или, как говорят, „жесткого“ света, который известен под названием рентгеновых лучей. Их применение в медицине, основанное на большой проникающей способности этих лучей, широко известно. Ими пользуются не только для диагностики (обнаружение неисправностей в человеческом организме), но и для лечения (поверхностная и глубокая терапия). Рентгеновы лучи получают из года в год все более и более широкое распространение в металлургии и металлообрабатывающей промышленности, позволяя „заглянуть“ внутрь сплошных металлических изделий (валы, маховики, моторные блоки и т. д.) и установить их пригодность еще до окончательной обработки (просвечивание), а также являются мощным подспорьем при исследовании строения металлов (сплавы) и тех изменений, которые в них вызывают холодная и горячая обработка (размер и строение зерен металла, их взаимное расположение и т. д.).

Химические свойства атомов и ионы Можно было бы без конца заниматься пере-
числением областей, в которых выяснение природы
электронной оболочки произвело решительный
переворот, позволило объяснить происходящие явления, овла-

деть ими и использовать их в бесчисленных технических применениях.

К ним относятся — магнитные свойства материалов, целиком определяющиеся свойствами электронной оболочки; электрические свойства — проводимость, электрическая прочность твердых, жидких и газообразных тел и т. д., механические свойства твердого тела и другие свойства, непосредственным образом определяющие технические применения данного вещества. Однако, несмотря на весь интерес и поучительность этой страницы истории развития физики и ее технических применений, мы не можем здесь остановиться на них подробнее и упомянем только о том, как связаны химические свойства атома с его электронной оболочкой.

Под действием внешних воздействий электрон может быть не только „оттянут“ из своего первоначального положения в оболочке на большее расстояние от ядра (возбуждение), но и вовсе оторван от атома (ионизация). Так как в своем нормальном состоянии атом электрически нейтрален (положительный заряд ядра равен отрицательному заряду оболочки), то при ионизации (отрыв электрона) у атома обнаруживается положительный заряд, равный элементарному заряду электрона. Такой атом носит название положительного иона. Можно оторвать от атома и не один, а два и более электронов, при чем получаются двух- и более зарядные ионы. В зависимости от того, как сильно связаны с ядром самые внешние электроны оболочки атома, для ионизации атома требуется большая или меньшая энергия. Например, атомы, так называемых, щелочных металлов (литий, калий, натрий, рубидий, цезий), у которых один из электронов оболочки связан с ядром очень слабо, теряют его сравнительно легко, „охотно“, образуя однозарядные положительные ионы.

В отличие от элементов с атомами, легко теряющими электроны, существуют атомы, электронная оболочка которых построена так, что в нее сравнительно легко может „пристроиться“ посторонний данному атому электрон, в результате чего образуется атом, у которого заряд электронной оболочки больше положительного заряда ядра, т. е. отрицательный ион. Таким образом, в зависимости от строения оболочки атом под влиянием достаточно мощных внешних воздействий (например, при ударе быстрых электронов) может преобразовываться в положительный ион, теряя один или несколько электронов, или в отрицательный — улавливая в свою оболочку один или несколько посторонних электронов.

Образование ионов играет решающую роль в целом ряде физических процессов, как то: проводимости жидкостей, разряде в газах. Исключительное значение ионы играют и в химических процессах. Встретившиеся друг с другом два иона разных знаков взаимно притягиваются, в результате чего происходит образование молекул — частиц из двух и более атомов, связанных

силами притяжения электрических зарядов.¹ Из свойств электронных оболочек вытекают, таким образом, все химические свойства атомов: их „валентность“, „химическое сродство“, стойкость сложных молекул. В электронных оболочках получает твердое обоснование вся химия, и разбор их строения позволяет овладеть самой сущностью химических превращений элементов, без чего невозможно управление ими и их использование для целей промышленности.

Мы видим, таким образом, что развитие наших представлений о строении внешней части атома, его электронной оболочки, дало громадный сдвиг в уяснении ряда „периферических свойств“ ядра. Электрические, магнитные, оптические, химические свойства вещества, определяющиеся строением внешней части атомов, получили разъяснение. Электронная теория атомов позволила предсказать многие свойства атомов, позволила овладеть рядом этих свойств.

Последствия выяснения структуры периферии атома огромны. Каждый день приносит известия о новых исследованиях, открывающих новые технические возможности, которые не могли бы быть использованы без детального знакомства со строением атома и со свойствами его периферической части. Выяснение электронной структуры периферии атома — это факт, имеющий колоссальное значение, это грандиозная победа исследователей, которая сделала эпоху в физике, открыв ряд технических возможностей громадного значения.

При описании всех тех многочисленных свойств „Ядерные свойства атома“ атомов, которые находят свое объяснение в строении его внешней электронной оболочки, мы совсем не касались его ядра, которое нас интересовало только как центральный положительный заряд, сдерживающий силой электрического притяжения электронную оболочку, представляющую рой обращающихся вокруг него электронов.

Однако значение атомного ядра далеко не исчерпывается его ролью „сдерживающего центра“. В самом деле, в ядре, прежде всего, сосредоточена почти вся масса (вес) атома. Если для водорода ядро в 1800 раз тяжелее, чем электрон в его оболочке, то для урана ядро уже примерно в 4000 раз тяжелее всей оболочки.

Таким образом, при различных движениях атома в целом (например, при движении ионов в сильно разреженном газе) внешняя оболочка с ее ничтожной массой играет весьма ма-

¹ Не всегда соединение двух или нескольких атомов в молекулу происходит благодаря силам притяжения между положительным ионом (атом, потерявший один или несколько электронов из оболочки) и отрицательным (атом с избыточными электронами в оболочке). В частности, возможны соединения двух одинаковых атомов (H_2 , O_2) и т. п. Взаимодействие в таких молекулах, называемых в отличие от гетерополярных, ионных — гомеополярными, также целиком определяется строением их электронных оболочек.

ную роль, и характер движения, определяющегося массой атома, зависит целиком от его ядра.

Существует целый ряд явлений, в которых на-ряду со свойствами электронной оболочки играет значительную роль и масса атома (явления теплопроводности, внутреннего трения и диффузии в газах и пр.). Исключительную роль играет масса атома, а значит и ядро, также в вопросах химии. Мы уже говорили о том, что химические соединения различных атомов обуславливаются связыванием их электронных оболочек, но нельзя забывать, что при химических превращениях атомы все-таки остаются в основном неизменными.

В самом деле, пусть кристалл каменной соли совершенно не похож на металл натрий (легкий, мягкий металл, чрезвычайно жадно соединяющийся с кислородом) и хлор (зеленоватый, ядовитый, тяжелый газ), но ведь каменную соль, образовавшуюся из этих двух веществ, можно разложить обратно на хлор и натрий или расплавив ее и пропуская электрический ток (промышленный способ добывания натрия), или путем очень сильного нагрева, или, наконец, рядом химических операций.

Атомы хлора так же, как и натрия, остаются в любых соединениях хлором и натрием. Вся химия построена на различных соединениях атомов 92 сортов, но при всех бесчисленных превращениях, которые претерпевают химические соединения, атомы каждого сорта сохраняют свою массу и заряд ядра, т. е. остаются теми же атомами, в каком бы соединении они ни были. Атом железа в метеорите, упавшем из необъятного межзвездного пространства, это такой же атом, как и тот, что проходит в составе кровяного тельца через наш мозг, как и тот, что связывается с углеродом в огнедышащей пасти магнитогорской домны, как и тот, что в виде красного соединения с кислородом придает окраску кирпичам, из которых сложены наши здания.

Химические превращения настолько резко изменяют большинство тел, что нелегко отказаться от впечатления о коренных, глубоких изменениях в атомах при химических реакциях.

В самом деле, что общего в драгоценном сапфире или рубине, который украшает ювелирные изделия, с кислородом, которым мы дышим, и с алюминием, из которого строим самолеты; что общего у васильковых, прозрачных кристаллов медного купороса с серой, медью и кислородом, — а между тем, сапфир и рубин представляют почти чистый глинозем — вещество, молекулы которого состоят из двух атомов алюминия и трех атомов кислорода, а медный купорос состоит, как известно, из меди, серы и кислорода.¹

¹ В окрашенные кристаллы медного купороса входит еще водород, но не в виде атомов, а в молекулах воды, которая размещается между молекулами сернокислой меди при кристаллизации медного купороса из раствора (кристаллизационная вода).

Тела, построенные из сложных молекул, вовсе не напоминают своими свойствами элементов, из атомов которых построены эти молекулы. Однако всегда можно без особых трудностей высвободить атом из соответствующей молекулы и убедиться в том, что при химических соединениях складываются, разрушаются и перестраиваются молекулы — комплексы атомов, но самые атомы остаются неизменными.

Действительно, производя электролиз (пропуская ток) через раствор глинозема в криолите (минерал, состоящий главным образом из фтористого натрия), мы можем выделить из глинозема алюминий, а нагревая до высокой температуры алюминий в присутствии кислорода, мы можем снова получить глинозем.

Подвергая электролизу раствор медного купороса, мы можем выделить из него медь и кислород, а опустив медь в серную кислоту, мы снова получим раствор медного купороса. Таким образом, выбирая подходящие воздействия (температура, электрическое поле и др.), мы можем производить всевозможные „химические превращения“, но эти превращения только „скользят по поверхности“ атомов, не изменяя их основной части — атомного ядра, которое определяет „лицо атома“, его химическую природу.

Химия среди миллионов химических превращений, которые непрерывно протекают в окружающем нас мире и в нас самих, не знает превращений атомов. 92 различных сорта атомов в бурном водовороте химических превращений связываются по одному, по два, иногда десятками и даже сотнями, образуя молекулы от простейших двуатомных до сложнейших органических (белки), разъединяются, заменяют друг друга, но не превращаются один в другой. Атом кислорода остается кислородом, атом железа — железом и золотом — золотом.

До последних двух десятилетий идея превращения элементов, зародившаяся в средние века (поиски „философского“ камня для превращения различных элементов в золото), оставалась беспочвенной, и химики свыклись с мыслью о том, что окружающие нас тела состоят из 92 различных сортов вещества. После того, как было выяснено строение атомов в общих чертах, стало ясным, что различие в 92 элементах заключается не в их электронных оболочках, а в „устройстве“ их ядер, однако от этого не стало легче, так как природа ядра оставалась совершенно неизвестной. Установить эту природу, разобраться в том, что представляет собой ядро, чем различаются ядра различных элементов, — вот те вопросы, которые стали в центре внимания физиков. И когда исторические исследования явления радиоактивности показали, что в состав положительных ядер некоторых элементов входят электроны (атомы отрицательного электричества), что ядра некоторых элементов претерпевают распад и превращение в другие ядра, когда, наконец,

Резерфорду удалось искусственно вызвать распад ядра и превращение элементов,—тогда отпали все искусственные перегородки, которые отделяли „92 сорта“ атомов, и начала развиваться и крепнуть мысль о том, что ядра всех элементов построены из одного и того же материала, что все элементы взаимно прерратимы. Примерно, в этой стадии находятся наши сведения о строении ядра на сегодняшний день. Завеса, прикрывающая строение ядра — самой важной, самой характерной и вместе с тем самой трудно доступной части атома, трещит под нетерпеливыми руками исследователей. Искусственные перегородки, затруднявшие в течение сотен лет объединение и обобщение наших представлений о веществе, о „кирпичах мироздания“, — рушатся.

Мы стоим на пороге величайших открытий современности, результаты которых ни учесть, ни предугадать нельзя. Мы только сейчас начинаем осознавать тот громадный толчок, который получила наука в результате разъяснения строения внешней электронной оболочки атома, и пожинать плоды тех технических применений, которые нам дало это расширение научного кругозора. А ведь к строению ядра мы только-только начали подходить. Важно лишь сказать, что разрешение проблемы ядра даст во всяком случае не меньший сдвиг в науке, чем выяснение природы внешней оболочки атома.

Энергетический
интерес пробле-
мы ядра

Мы не касались еще одной стороны проблемы ядра — стороны энергетической. Проблема изыскания новых источников энергии не случайно занимает все большее и большее место среди основных проблем современной науки. Использование энергии солнца, тепловых ресурсов водных массивов, механической энергии приливов постепенно перерастает из стадии полуфантастического прожектерства в стадию постановки опытов, экономических расчетов (см. дискуссию ак. Иоффе и инж. Регирера на страницах газеты „Техника“). Дело не только в том, что запасы энергии в виде ископаемого топлива (уголь, нефть, торф, сланцы), „белого“ (энергия падающей воды) и „голубого“ угля (энергия ветра) в течение ближайших двух-трех сотен лет при современном бурном развитии промышленности смогут оказаться на исходе, но и в том, кто первый — мы, страна, строящая социализм, или они, загнивающий капиталистический Запад, овладеет новыми, более обширными и более дешевыми энергетическими ресурсами. Такое положение обязывает нас, советских физиков и исследователей, отнестись с самым полным, глубоким вниманием ко всем возможностям использования новых видов энергии, к тщательной разведке и исследованию запасов энергии, может быть даже недоступных для нас на современной ступени технического развития, к подготовке методов завоевания этих запасов.

В таком положении как раз находится исследование проблемы энергии атомного ядра. Уже первые опыты, установившие явление радиоактивности, т. е. выбрасывания из ядер атомов некоторых тяжелых элементов положительно и отрицательно заряженных частиц, и испускание этими ядрами очень „жесткого света“ (с частотой большей, чем у рентгеновых лучей), показали, что при радиоактивных превращениях выделяется громадное количество энергии, намного превышающее количества, которые могут быть получены при сжигании наиболее теплотворных сортов топлива.

Выделение энергии при радиоактивном распаде

Правда, естественные радиоактивные превращения идут сравнительно очень медленно, зато общее количество энергии, выделяемое при распаде, скажем, одного грамма радия, примерно равно той энергии, которая выделяется при сжигании полутонны лучшего твердого топлива. Конечно не в использовании энергии распада радия искать новый источник энергии. Ведь грамм радия в сотни раз дороже тонны угля. Энергетическая ценность этого открытия заключается в том, что оно впервые указало на наличие внутри ядер атомов грандиозных запасов энергии.

Принцип эквивалентности массы и энергии

Дальнейшие успехи в оценке запасов внутриатомной энергии оказались возможными после разработки Астоном метода чрезвычайно точного определения атомных весов (см. следующую главу) и после установления высказанного знаменитым творцом теории относительности Эйнштейном принципа эквивалентности массы и энергии, из которого вытекает, что всякая энергия обладает массой.

Согласно этому принципу, масса всякой системы, обладающей некоторым запасом энергии, т. е. системы неустойчивой, которая при разрушении выделяет энергию, — несколько больше массы ее составных частей (например, заряд патрона до выстрела весит несколько больше, чем продукты горения заряда). Однако в обычных условиях при тех запасах энергии, о которых идет речь при химических превращениях, эти изменения массы настолько ничтожны, что никакими самыми точными методами этого изменения измерить нельзя, и в химии „закон сохранения массы“ считается поэтому неизменным. Масса устойчивых образований, для разрушения которых нужно затратить некоторое количество энергии, несколько меньше массы их составных частей.¹

После того, как исследования Астона, Резерфорда и других (см. следующую главу) позволили сделать некоторые заключе-

¹ Масса E эргов энергии равна $\frac{E}{c^2}$ грамм, при чем c — скорость света, а $c^2 = 9 \times 10^{20}$.

ния о строении ядра, оказалось возможным ориентировочно оценить и те количества энергии, которые могут быть выделены при образовании или распаде ядер некоторых элементов.

Энергия обра-
зования ядра
гелия

Подсчет дал для некоторых ядер огромные значения; так, например, оказывается, что при образовании 1 ядра гелия из 4 ядер водорода и 2 электронов выделяется энергия в 0,00004 эрга, что в пересчете на грамм гелия дает энергию в 150 млн больших калорий, 170 000 киловатт-часов, т. е. равносильна энергии сжигания 20 тонн лучшего твердого топлива. Таким образом, если бы мы только сумели создать условия, при которых пошло бы превращение водорода в гелий, то одного грамма водорода хватило бы для замены энергии, вырабатываемой Днепрэльстаном в течение полчаса.

Сейчас мы ничего еще не можем сказать о том, каким образом создать те условия, которые способствуют превращению водорода в гелий, — но уже новейшие опыты Кокрофта и Уолтона указывают на возможность искусственного расщепления ядер ряда элементов с выделением значительной энергии.

Разумеется, от этих подсчетов до технического применения — „дистанция огромного размера“, однако ничто не указывает на принципиальную невозможность искусственного возбуждения процесса распада и образования ядер, а необыкновенные технические перспективы использования чудовищных запасов внутриядерной энергии делают атомное ядро еще более привлекательным предметом систематического исследования.

Таким образом, проблема атомного ядра заслуженно заняла центральное место. Не даром передовые отряды ученых всего мира ведут с разных концов штурм этой маленькой твердыни, этой самой маленькой и вместе с тем самой важной и самой хорошо защищенной крепости во всей вселенной.

Не даром передовые лаборатории Союза включились в атаку атомного ядра, поставив перед собой задание и на этом участке догнать и перегнать капиталистические страны Западной Европы и Америки.

Перед нами, физиками Союза, стоит задача не только ожесточенно бороться за первенство в деле исследования ядра, но и широко популяризовать проблему ядра среди трудящихся масс нашей страны, осветить перед ними всю важность и глубину этой проблемы, рассказать о тех трудностях, которые стоят перед нами, о том, как мы их преодолеваем, о достижениях зарубежных ученых, о тех этапах, которые нам предстоит пройти и которые нами уже пройдены. Это и является целью, которую поставил перед собой автор книжки, представляющей попытку в небольшом объеме дать очерк основных методов исследования ядра и тех результатов, которые с помощью их достигнуты.

II. ОСНОВНЫЕ ПОДСТУПЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ЯДРА

Все то, что на сегодняшний день известно об атоме и его ядре, приводит к убеждению, что все известные нам атомы состоят из двух сортов частиц. О первом из этих сортов — электронах, атомах отрицательного электричества с малой массой ($\frac{1}{1844}$ массы самого легкого атома — атома водорода), нам уже пришлось немало говорить, когда мы касались строения внешней части атома и его периферических свойств.

Вторым сортом являются протоны — положительно заряженные ядра атома водорода, заряд которых по величине равен заряду электрона, а масса в 1844 раза больше.

Более ста лет тому назад английский врач и химик Прout впервые высказал предположение о том, что водород — самый легкий из всех веществ — является тем первичным веществом, из которого построены атомы остальных, более тяжелых элементов.

В его время атомные веса были известны не с большой точностью и не для всех элементов. Прoutа на его идею натолкнуло то обстоятельство, что для многих элементов атомные веса представляли примерно целое кратное атомного веса водорода. Позже, по мере усовершенствования методов определения атомного веса, было установлено, что, если атомный вес водорода условно принять за единицу, то атомные веса других элементов вовсе не всегда выражаются целыми числами. Эти измерения подорвали авторитет представлений Прoutа, которые в течение многих лет казались противоречащими данным опыта.

Только много позже, уже в двадцатом веке, Астону удалось разработать гораздо более совершенный способ определения атомных весов, которого мы подробнее коснемся ниже и который привел к удивительному открытию, заставившему отнестись с большим вниманием к заброшенным идеям Прoutа. Открытие заключалось в том, что атомные веса всех элементов (т. е. удельные веса их атомов по отношению к атому водорода) действительно выражаются целыми числами¹ и что вместе с тем правы химики, которые, определяя, например, атомный вес хлора, давали для него цифру, близкую к 35,5, т. е. отнюдь не целое число.

Это кажущееся противоречие разрешается существованием у ряда элементов так называемых изотопов. Изотопами были названы различные элементы или, вернее, разные „сорта“ одного и того же элемента, которые тождественны во всех своих химических и почти во всех физи-

¹ Если пренебречь небольшими поправками, которые связаны, как указывалось выше, с запасами внутриатомной энергии.

ческих свойствах и различаются только массой (весом) своих атомов. Естественно, конечно, что химики, определяя атомный вес какого-нибудь элемента, состоящего из двух или нескольких изотопов, могли получать и получали нецелые значения атомных весов. Например, для хлора, обладающего двумя изотопами, „хлор 35“ и „хлор 37“, при чем атомов хлора 35 примерно в три раза больше, чем хлора 37, суммарный химический метод даст 35,5 — среднее значение атомного веса для обоих изотопов.

Выбивание протонов из ядер

То, что масса всех атомов представляет целое кратное массы атома водорода, само по себе подсказывает, что ядра всех атомов состоят из протонов, ядер водорода. Однако это предположение стало вполне достоверным только после того, как Резерфорду в 1919 г., а вслед за ним венцам Петерсену и Киршу удалось более непосредственно убедиться в том, что водородные ядра являются наряду с электронами вторым основным строительным материалом, из которого образованы атомы элементов. Бомбардируя вещества, в состав которых входят легкие элементы, несущимися с громадной скоростью заряженными частицами, названные ученые убедились в том, что удары этих частиц выбивают из ядер ряда элементов протоны — положительные ядра водорода. Таким образом, можно с большой степенью достоверности утверждать, что ядра элементов действительно построены из протонов. Однако остается нерешенным вопрос о том, из одних ли протонов состоят эти ядра, — и на этот вопрос приходится сразу дать отрицательный ответ.

Атомный вес и атомный номер

Если бы ядра всех элементов состояли только из протонов, то атомный вес для любого атома равнялся бы заряду его ядра (предполагающее, что под атомным весом мы понимаем число, показывающее, во сколько раз атом данного вещества тяжелее атома водорода; заряд ядра мы измеряем в элементарных зарядах, равных заряду электрона или протона). Измеренный таким образом заряд равен числу электронов в оболочке атома и носит название „атомного номера“.

В самом деле, если допустить, что ядро состоит только из десяти протонов, то атомный вес такого атома равен десяти, а заряд ядра (атомный номер) также должен равняться десяти. Атомный номер, или число электронов в оболочке, определяет целый ряд атомных свойств и может быть благодаря этому установлен с полной достоверностью. Оказывается, что из всех существующих элементов только для одного водорода атомный

¹ Опытами Резерфорда и его школы, которые будут подробнее описаны ниже, было установлено выбивание ядер водорода из 13 легких элементов (от бора до калия, за исключением углерода и кислорода); Петерсен и Кирш считают доказанным выбивание ядер водорода еще из многих других, более тяжелых атомов.



вес равен атомному номеру, для всех же остальных элементов атомный вес больше атомного номера. Заряд ядра меньше, чем ему следовало бы быть, если бы оно состояло исключительно из протонов. Вес атома указывает на то, что ядро состоит из протонов, и это предположение подтверждается опытами с разбиванием ядер. Вместе с тем, по атомному номеру можно утверждать, что, если ядро и состоит из протонов, то заряд ядра меньше суммы зарядов этих протонов.

В каком случае это может быть? В том и только в том случае, если заряд части ядерных протонов скомпенсирован отрицательно заряженными частицами, входящими в состав ядра, при чем масса этих частиц должна быть очень малой (иначе не получится целого атомного веса).

Внутриядерные электроны

Нам известны частицы, удовлетворяющие этим условиям. Это не что иное, как электроны. Допустив, что в состав ядра, кроме протонов, входят еще и электроны, так называемые внутриядерные электроны (их не следует путать с электронной оболочкой, окружающей ядро), мы можем легко объяснить неравенство атомного веса и атомного номера. В самом деле, если ядро состоит из десяти протонов и четырех электронов, то атомный вес равен десяти, а атомный номер (заряд ядра) на четыре единицы меньше, т. е. равен шести. Зная атомный вес и атомный номер, мы можем „угадать“, сколько протонов и электронов входит в состав ядра любого элемента. Читатель, взяв таблицу Менделеева, сможет без труда дать „анализ ядра“ для всех 92 элементов; мы же для примера приведем этот анализ только для нескольких элементов:

Элемент	Атомный вес (число протонов в ядре)	Атомный номер (число электронов в оболочке)	Число внутриядерных электронов (атомный вес минус атомный номер)
Водород . . .	1	1	0
Углерод . . .	12	6	6
Алюминий . . .	27	13	14
Железо 56 . . .	56	26	30
Железо 54 . . .	54	26	28
Медь 63 . . .	63	29	34
Медь 65 . . .	65	29	36
Уран	238	92	146

Явление радиоактивности, открытое Беккерелем в 1895 г., которое дало нам первые сведения о строении атомного ядра, веско подтверждает представление о внутриядерных электронах.

Ядра ряда тяжелых элементов неустойчивы, они „самостоятельно“, т. е. без внешних воздействий распадаются, выбрасыва-

вая два рода частиц так называемые α - и β -лучи (альфа- и бета-лучи) и „жесткий“ невидимый свет — γ -лучи (гамма-лучи). Исследования над β -частицами сразу же показали, что последние представляют не что иное, как быстрые электроны. Таким образом, было установлено, что из ядер радиоактивных элементов выбрасываются электроны, и, следовательно, представление о внутриядерных электронах получило солидное обоснование.

Загадки ядра Как видите, в физике ядра уже наметились основные отправные пункты, кое-что уже известно, кое о чем можно догадываться; но некоторые вопросы все до сих пор ставят исследователей в тупик.

Согласно изложенных представлений атомы состоят из двух основных типов частиц: электронов, более легких частиц, носителей отрицательного заряда, и протонов, примерно в 2000 раз более тяжелых частиц, заряженных положительно. Атомы построены в виде положительного ядра, окутанного облаком или роем обращающихся вокруг него отрицательных электронов, при чем положительный заряд ядра равен суммарному отрицательному заряду этой электронной атмосферы. Число электронов в оболочке и строение ее определяют химические, оптические и многие другие свойства атома. Почти вся масса атома, однако, сосредоточена в его ядре. Атомные веса выражаются целыми числами, что указывает на то, что ядра состоят из протонов.

Различие между атомным весом и зарядом ядра указывает на наличие внутри ядра электронов, которые своим присутствием почти не меняют массу ядра, но сильно уменьшают его положительный заряд, компенсируя часть заряда протонов. Предположение о внутриядерных электронах подтверждается испусканием β -частиц ядрами радиоактивных элементов.

Однако во всех этих представлениях остается совершенно открытым вопрос об устойчивости атомного ядра, о сожительстве в минимальном объеме отрицательных и положительных частиц, о запасе внутриатомной энергии и т. д. В самом деле, ядро в целом положительно; между протонами должны возникнуть и проявляться громадные силы отталкивания.

Что же сдерживает между собою отдельные протоны? Что препятствует атому „взлететь на воздух“, разрушиться? Почему это все-таки происходит у радиоактивных элементов? Эти и бесчисленное множество других вопросов, относящихся к „загадке“ ядра, остаются на очереди и подлежат разрешению по мере дальнейшего исследования.

Основные направления исследования ядра Для того, чтобы овладеть загадкой атомного ядра, и познакомиться с деталями его строения, приходится подробно изучать все свойства атомов, прямо или косвенно связанные с его ядром.

Задача осложняется тем, что сравнительно небольшое число

этих свойств зависит только от ядра, в большинстве явлений в мире атомов ту или иную роль играют их периферические электроны. Кроме того, непосредственное исследование ядра требует чрезвычайно мощных воздействий на атом, так как ядро представляет в большинстве случаев очень прочное образование, в отличие от электронной оболочки, которая легко реагирует на всякого рода внешние воздействия.

Трудности, связанные с исследованием ядерных свойств, заставили исследователей атомного ядра разработать ряд совершенно различных методов исследования ядра, подходить к нему с разных сторон, проверяя одним методом результаты другого, завоевывая пядь за пядью подступы к ядру, собирая отрывочные мелкие штрихи, характеризующие его, и составляя из них все более и более полную картину его строения. Мы не сможем здесь подробно остановиться на всех исследованиях, которые дают какие бы то ни было сведения о строении ядра. Для этой цели нам пришлось бы коснуться приемов и технических ухищрений, применяемых в самых различных физических изысканиях. Приходится ограничиться перечислением основных методов и объяснением их принципов. Более подробно нам удастся описать последние исследования по разрушению ядер — „молодую“ отрасль исследования ядра, которая, вместе с тем, представляется наиболее мощным и обещающим приемом.

Оптические методы исследования ядра

Мы уже говорили о том, как атом испускает свет. Возбужденные внешним воздействием периферические электроны, возвращаясь в свое исходное положение в оболочке, отдают избыточную энергию в виде света видимого, если электрон слабо связан с атомом, и более высокочастотного невидимого (ультрафиолетового или рентгеновского), если были возбуждены „глубокие“ электроны оболочки, более прочно связанные с ядром. „Состав“ излучаемого атомом света или его спектр, определяется устройством электронной оболочки, а так как все атомы одного и того же элемента построены одинаково, то атомы этого элемента испускают излучение одинакового состава. Каждый элемент имеет вполне определенный спектр, вполне определенный набор колебаний. Подобно тому, как пианино может издавать известный набор звуков, определяемый числом, натяжением и длиной струн, так и атом излучает свет строго определенных частот или длин волн, и этот спектр определяется числом электронов, зарядом ядра и характером движения электрона в оболочке. Изменяя характер движения электронов в атоме, мы можем изменить и испускаемый им спектр.

Явление Зеемана

Одним из методов воздействия иввне на характер движения электронов в оболочке атома является помещение излучающих атомов в магнитное поле. Исследуя спектр светящегося газа, в одном слу-

чае без поля, в другом — между полюсами сильного электромагнита, Зееман установил резкое различие в этих спектрах. Влияние магнитного поля на спектр носит поэтому название эффекта или явления Зеемана. Нетрудно понять, почему магнитное поле видоизменяет движение электронов внутри атома. Ведь каждый обращающийся вокруг ядра электрон представляет собой как бы замкнутый ток, который, как известно, обладает свойствами магнита, и, следовательно, должен „поворачиваться“ под действием магнитного поля.

Детальное исследование явления Зеемана позволило сделать чрезвычайно ценные заключения о характере движения электронов в оболочке атома. Мало того, по мере усовершенствования методов исследования спектров, становилось все более и более очевидным, что каждый электрон, помимо обращения вокруг атомного ядра, обладает еще и „собственным вращением“, подобно волчку или земному шару, который, обращаясь вокруг Солнца, одновременно вертится вокруг собственной оси. Таким образом, каждый электрон-волчок является маленьким магнитиком или, как говорят, обладает магнитным моментом.

Самые новейшие исследования показывают, что для объяснения всех деталей явления Зеемана необходимо допустить, что и ядро атома тоже представляет собою магнитик. Таким образом, исследование эффекта Зеемана представляет один из путей изучения ядра. Зная магнитные свойства отдельного электрона, число внутриядерных электронов и магнитные свойства всего ядра в целом, можно делать некоторые заключения о строении ядра.

Нельзя сказать, что этот оптический путь сам по себе дал много ценных сведений. Магнитные свойства ядер выражены настолько слабо, что только самые мощные оптические методы, имеющиеся в руках современного физика-экспериментатора, дают некоторое представление о них. Однако в соединении с другими более непосредственными методами исследования оптический метод является чрезвычайно ценным подспорьем, тем более, что даваемые им сведения о ядре основываются не только на изучении явления Зеемана.

Мы уже говорили о том, что отдельные атомы, связываясь электрическими силами взаимодействия, образуют более сложные частицы — молекулы.

Молекулярные спектры
Простейшие молекулы состоят из двух атомов (например, молекула водорода H_2 , хлороводородной кислоты HCl , угарного газа CO), более сложные — из трех и более атомов. Под влиянием внешних воздействий (удары частиц, раскачивание светом) молекулы так же, как и атомы, излучают свет, однако излучение света происходит нередко несколько иначе, чем у атомов. Помимо „электронного спектра“, излучаемого так же, как и в атоме, возбужденными электронами, когда они „проваливаются“ на свое нормальное „насиженное“ место внутри электронной

оболочки, молекула может излучать еще и свой специфический молекулярный спектр.

Чтобы понять, откуда берется этот спектр, рассмотрим простейшую двухатомную молекулу, которую мы грубо можем себе представить (рис. 1) как два тяжелых шарика, связанных между собой пружиной. Шарика—это ядра атомов, образующих молекулу; в виде пружинки представлены электрические силы связывающие их между собой. В то время как потенциальная энергия атома определяется положением электронов в его оболочке, потенциальная энергия молекулы (в простейшем случае—двухатомной, строение которой представлено на условной схеме

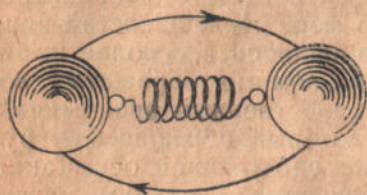


Рис. 1

рис. 1) будет зависеть не только от положения электронов в электронной оболочке (которая на этом рисунке не изображена), но и от взаимного расположения и свойств входящих в нее ядер.

Подобно тому, как атом при удалении электрона со своего обычного положения оказывается возбужденным, в роде оттянутой струны, молекула может быть возбуждена при изменении взаимного расположения ядер. В силу этого молекулы, кроме „электронного спектра“, связанного с возвращением электронов из возбужденного состояния в нормальное, излучают электромагнитные колебания, связанные с изменением взаимного расположения ядер.

Излучаемый при этом молекулами спектр дает некоторое представление о строении входящих в них ядер.

Детали явления Зеемана и молекулярные спектры — один из подступов к проблеме ядра. Как то, так и другое явление требует для своего исследования точнейших оптических методов, представляющих вершины экспериментальной техники. У нас в Союзе такого рода исследования ведутся в Государственном Оптическом институте в Ленинграде. Работы проф. Фриша и других научных сотрудников этого института стоят на уровне передовых заграничных институтов и уже дали ценные сведения о величине магнитного момента ядер некоторых элементов.

Молекулярные спектры позволяют также подойти к исследованию изотопов некоторых элементов; однако вопросы изотопии, как и вообще свойств атомов, непосредственно связанных с массой ядра, до последнего времени разрешались по методу, разработанному Астоном; мы сможем коснуться этого метода более подробно в связи с тем, что „магнитно-электрическое взвешивание“ или масс-спектроскопия является одним из наиболее важных методов исследования атомных ядер и продуктов их естественного и искусственного распада.

Взвешивание атомов и их осколков налету

Существует только один путь для бесспорного и точного анализа пучка элементарных частиц, который позволяет с величайшей точностью измерить массу заряженной частицы (если заряд ее известен), и поэтому является одним из самых ценных способов исследования атомного ядра.

В сущности говоря, этот метод, техническое оформление которого принадлежит Астону, непосредственно дает „удельный заряд“ частицы, т. е. отношение ее заряда e к массе m , величину, которую принято обозначать $\frac{e}{m}$. Определение этой величины сводится к измерению отклонения, которое претерпевают частицы под действием отклоняющих электрической и магнитной сил. Электрический заряд частицы определяет отклоняющую силу, испытываемую при пролете сквозь электрическое и магнитное поле. Отклонению противодействует инертная

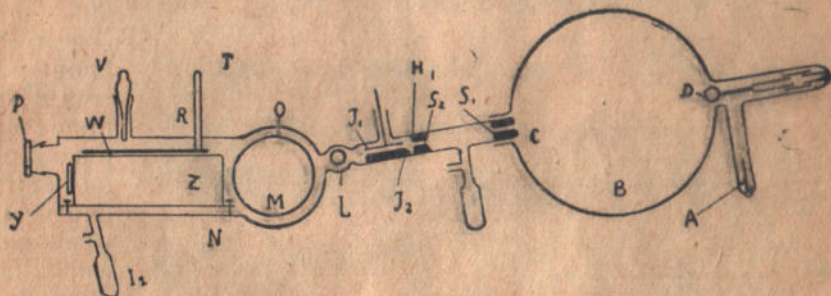


Рис. 2

масса частицы, благодаря которой последняя стремится сохранить первоначальное направление полета. Поэтому отклонение прямо пропорционально e , обратно пропорционально m и зависит также от скорости частицы v , при чем „непреклонность“ частицы, т. е. ее противодействие отклоняющим силам в электрическом и магнитном поле, растет с увеличением скорости. По счастью, однако, электрическое и магнитное отклонение различно зависят от скорости (первое обратно пропорционально v , второе — v^2); поэтому измерение отклонения частиц в электрическом и магнитном поле одновременно позволяет вычислить как их скорость v , так и удельный заряд $\frac{e}{m}$.

Весьма изящный способ Астона, позволяющий осуществить это измерение, заключается в следующем. Узкий пучок положительно заряженных частиц, вылетающих из разрядной трубки B и выбранных узкими щелями S_1 и S_2 (рис. 2), проходит вначале через электрическое поле (между пластинами J_1 и J_2 , заряженными разным знаком), а затем через магнитное поле в M ,

при чем направление электрического и магнитного полей выбраны таким образом, что они дают отклонения в противоположные стороны. При подборе соотношения электрического и магнитного поля Астону удалось добиться того, что частицы разной скорости, но одинакового удельного заряда $\frac{e}{m}$, попали в одно и то же место экрана У, давая на нем как бы изображение щели.

Таким образом, пучок частиц с различным отношением

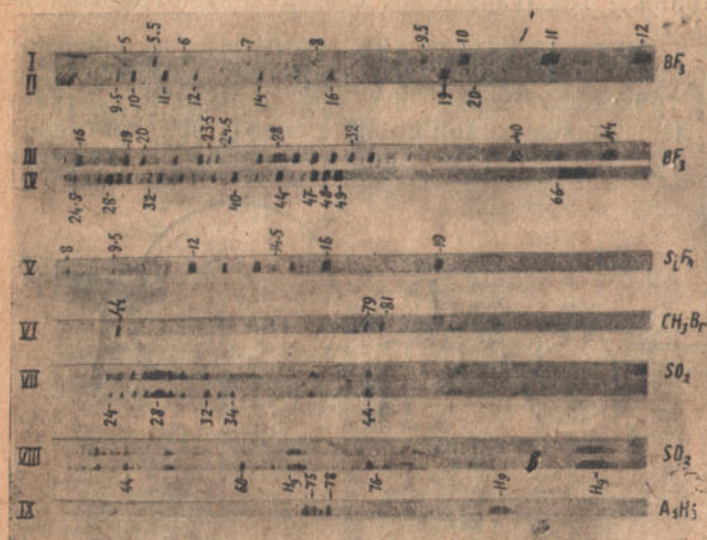


Рис. 3с

(рис. 3) $\frac{e}{m}$ разлагается, давая на экране ряд черточек (изображений щели), „чистое“ отклонение которых от оси прибора, т.е. разность электрического и направленного в противоположную сторону магнитного отклонений, пропорциональ-

но удельному заряду.

С помощью этого метода Астону удалось произвести свои знаменитые измерения $\frac{e}{m}$ для ионов в различных элементах. Так как заряд частиц представляет целое кратное заряду водородного иона — протона и равен обычно 1, 2, иногда 3 таким зарядам, то, на основании отклонений черточек или линий „масс-спектра“, оказывается возможным без труда определить массу различных атомов.

Опыт Астона представляет не что иное, как своего рода взвешивание атомов во время полета. Пользуясь своим прибором, который получил название масс-спектрографа, Астон показал, что большинство элементов состоит из атомов не одного сорта, а из двух или нескольких изотопов, атомные веса которых отличаются на одну или несколько единиц. В противовес прежним представлениям, масса атома и

атомный вес не определяют, как мы видели, химических свойств атома; все периферические свойства (химические, оптические и т. д.) определяются электрическим зарядом ядра, числом его элементарных зарядов, которое совпадает с порядковым номером атома в периодической системе элементов.

В самом деле, величина этого заряда однозначно определяет внешние действия атома, т. е. число и группировку тех электронов, которые образуют оболочку и осуществляют связь между атомом и внешним миром. Таким образом, атомы с одним и тем же зарядом ядра являются изотопами одного и того же элемента, при чем слово изотоп (от греческого *изос* — одинаковый, равный, и *топос* — место) означает, что эти элементы занимают одно и то же место в последовательности элементов, несмотря на то, что их атомные веса могут отличаться на несколько единиц. Ряд масс-спектрограмм Астона, на основании которых было сделано открытие изотопов, приведен на рис. 3. Внимательно рассмотрев этот рисунок, можно заметить линии, соответствующие изотопам одного и того же элемента.

Таким образом, масс-спектрограф производит разделение, сортировку пучка частиц различной массы, нечто в роде того, что проделывают еще и посейчас в глухих медвежьих уголках Союза, отсеивая зерно от мякины, перебрасывая его лопатой из одного угла амбара в другой, при этом более тяжелые зерна летят дальше, а мякина отпадает по дороге, не долетая туда, куда падает зерно. Метод Астона никоим образом не является способом расщепления атомов; при его применении свойства атомов остаются совершенно неизменными; с его помощью достигается лишь разделение уже существующих в пучке различных по своей массе ионов. Говоря о разрушении ядер, мы опишем применение масс-спектрографа к исследованию продуктов разрушения атомов. Благодаря большой скорости исследуемых частиц и их ничтожно малому количеству в этом случае приходится прибегать к громадным электрическим и магнитным полям и к особым способам регистрации падающих на экран частиц, однако принцип способа остается тем же, что и у Астона.

Астон, в течение многих лет совершенствуя свой прибор, достиг громадной точности в измерении атомных весов, достигающей в лучших случаях сотых долей процента. Такое точное определение представляет громадный интерес в связи с тем, что для ряда элементов точное значение атомного веса — единственное данное для суждения о внутриядерной энергии.

Разумеется, измерение с точностью до сотых долей процента дается нелегко. Прежде всего с соответствующей точностью следует измерить и поддерживать постоянными электрическое и магнитное поля. „Линии“ масс-спектра должны быть чрезвычайно резкими, для чего атомы в течение всего своего полета не должны рассеиваться в приборе столкновениями об атомы и молекулы газа, который для этого со всевозможной тщатель-

ностью выкачивается; наконец, высокие требования предъявляются также и к чувствительному слою фотографической пленки или пластинки, которая устанавливается на экране (рис. 2) и служит для запечатления масс-спектра.

Масс-спектрография требует высокой экспериментальной техники, которая развита Астоном и его школой; она постепенно осваивается и физиками Союза, показателем чего могут служить работы Яковлева (физический институт московского университета) по масс-спектрографическому разделению изотопов. Эта задача представляет особый интерес в силу того, что, вследствие тождественности большинства физических и химических свойств изотопов, их разделение другими способами чрезвычайно затруднительно.

Таким образом масс-спектрография, являющаяся одним из основных источников наших сведений о ядре и дающая ответы на вопросы о точном значении массы атомов, а отсюда и о внутренней энергии, о числе и относительном количестве изотопов, о природе осколков атомов, возникающих при естественном или искусственном распаде атомных ядер, — становится достоянием советской науки.

Открытие явления радиоактивности дало первые достаточно достоверные сведения о строении ядра, и до нынешнего года радиоактивные элементы представляли самое необходимое орудие для исследования ядер. Это заставляет нас особенно заострить внимание на явлениях радиоактивности, рассмотреть достаточно подробно как основные факты, которые легли в основу наших представлений о ядре, так и те технические приемы, которые были выработаны в течение почти сорока лет работы над явлениями радиоактивности.

III. РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Открытие Беккереля, α - и β -лучи В 1896 году Беккерель случайно установил излучение, испускаемое наиболее тяжелым из существующих атомов — атомом урана. Он показал также, что эти лучи проникают, подобно лучам Рентгена, сквозь различные вещества и действуют на фотографические пластинки. Дальнейшие исследования показали, что излучение урана состоит из трех различных составных частей, из которых одна очень похожа на лучи Рентгена, но обладает еще большей проникающей способностью, вторая — ничто иное, как катодные лучи, т. е. пучок быстро несущихся электронов, наконец, третья составная часть представляет пучок быстрых положительно заряженных частиц. Эти три сорта „лучей“ были названы по первым буквам греческого алфавита соответственно γ -, β - и α -лучами. Они могут быть легко „рассортированы“ действием сильного магнитного поля, как это показано на известном схематическом рисунке 4.

α -лучи (хотя и незначительно) отклоняются магнитным полем в направлении, по которому можно заключить, что они представляют быстрые положительно заряженные частицы. β -лучи отклоняются значительно сильнее и в противоположном направлении, откуда можно заключить, что эти частицы заряжены отрицательно и обладают значительно меньшей массой. Нетрудно было установить их тождество с электронами. Наконец γ -лучи в самых сильных полях остаются неотклоненными от своего первоначального направления, т. е. ведут себя подобно видимому свету или рентгеновым лучам.

Дальнейшим исследованием этих лучей мы обязаны супругам Кюри, которым впервые удалось (1898 г.) выделить из природного минерала — смоляной обманки — небольшое количество знаменитого элемента радия, „радиоактивность“ которого, т. е.

способность к испусканию указанных типов излучения, в миллионы раз сильнее, чем у урана. Фотографические методы исследования вскоре отошли на второй план и были вытеснены значительно более чувствительными электрическими методами, основанными на том, что все три типа лучей, проходя в газах, делают их проводящими, производя

на своем пути ионизацию, т. е. отщепление электронов от оболочки атомов газа, благодаря чему в газе, наряду с нейтральными (не заряженными) атомами, появляются носители электричества, которые перемещаются в электрическом поле, давая ток.

Дальнейшее исследование явлений радиоактивности вскрыло целый ряд новых неизвестных дотоле явлений, истолкование которых привело к совершенно новым представлениям о строении атомов. Оно указало на наличие внутриядерных запасов энергии, неизмеримо больших, чем энергия всех известных химических соединений, и опровергло создавшееся в течение веков представление о неделимости и вечности атомов. Атомы могут образовываться и распадаться, „рождаться“ и „умирать“, и закон постоянной изменчивости движения, преобразования оказался, таким образом, применимым и к основным химическим элементам.

Более того, в течение последних пятнадцати лет радиоактивные элементы в руках самого выдающегося из современных исследователей атомного ядра Эрнста Резерфорда (рис. 5) ока-

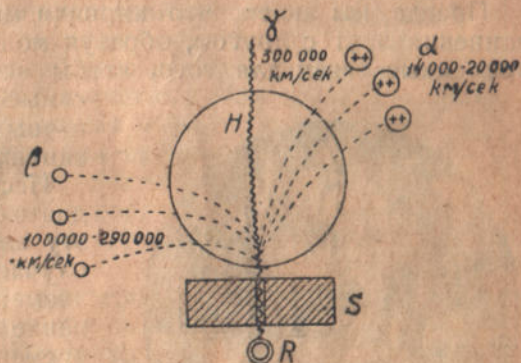


Рис. 4

зались орудием, с помощью которого удалось осуществить превращение других нераспадающихся „самопроизвольно“ атомов. Быстрые α -частицы, пробивая „силовую броню“, защищающую внутреннюю часть атома, достигают его ядра, разбивают это ядро, при чем осколки атома вылетают прочь, и образуется новый тип атома.

Это вынужденное взрывом атома превращение элементов и представляет наиболее мощный прием атаки ядра, тот „лобовой удар“, о котором мы и будем главным образом говорить.

Радиоактивность Принято считать, что болезнь и смерть—бедствия, которые преследуют нас, живых и, конечно, минуют мир атомов.

Правда, мы знаем, что кирпичи мироздания вступают в соединения друг с другом, образуя молекулы, и расторгают эти временные связи для того, чтобы вступить в другие, однако самые атомы принято считать вечными и неизменными образованиями.



Рис. 5

Исследования последних тридцати с лишним лет отняли у нас эту иллюзию. Атомы, во всяком случае атомы наиболее тяжелых элементов, как и мы, живут в течение ограниченного периода времени. Они рождаются, от рождения несут в себе зародыш своей гибели и по прошествии некоторого срока внезапно и бурно умирают. Их смерть — катастрофа в атомном мире, чудовищный взрыв, распад, при котором часть умирающего атома выбрасывается с такой силой,

что она пронизывает сотни тысяч других атомов и в некоторых случаях даже наносит им смертельные раны.

Все это относится к замечательной группе явлений, которые носят название радиоактивности, открытие которой, более чем какие-либо другие открытия, сделало эпоху в физике и химии. Помимо этого, открытие радиоактивности вызвало грандиозные сдвиги в ряде смежных наук и, прежде всего, позволило заглянуть в тайны неорганической материи значительно глубже, чем можно было предвидеть лет тридцать-сорок тому назад. Наиболее удивительным для физиков в этих новооткрытых явлениях казалось то, что радиоактивное излучение на первый взгляд не вызывает никаких заметных изменений в излучающем веществе.

Кажущееся
несохранение
Энергии

Соответствующее излучению громадное выделение энергии, которое может быть установлено не только такими чувствительными приборами, как электроскоп и фотографическая пластинка, но

для препаратов значительной активности—даже просто термометром, казалось протворечащим принципу сохранения энергии. Этот принцип или закон, который уже в течение сотни лет является основой всей физики, гласит, что выделение энергии в каком бы то ни было виде может иметь место только за счет потребления соответствующего количества энергии. Вот этого-то источника энергии вначале и не могли усмотреть в явлениях радиоактивности. Были высказаны довольно фантастические предположения о том, что неизвестный вид излучения, которое доходит до земли из мирового пространства, всасывается и накапливается атомами радиоактивных веществ и выделяется ими в виде радиоактивных излучений. Окончательное решение загадки, данное Резерфордом и Содди, представлялось на первый взгляд не менее фантастическим. Они высказали предположение, что энергия, выделяемая в виде излучения, исходит из недр атомов и выделяется при превращении или распаде их ядер. Выделение этой энергии настолько огромно, что достаточно превращения в высшей степени ограниченного числа атомов за единицу времени для того, чтобы объяснить наблюдаемые действия.

Радиоактивные элементы претерпевают таким образом постепенное превращение, и первоначальное количество их атомов неуклонно падает. Вновь образовавшиеся атомы, образующиеся при распаде, как правило, и сами активны, т. е. в свою очередь испускают лучи и образуют новые, опять таки активные продукты превращений.

Отсюда следует, что рано или поздно среди членов такого ряда распадающихся и переходящих друг в друга элементов устанавливается своеобразное подвижное равновесие.

Радиоактивное равновесие } Характеризуется оно тем, что для каждого сорта атомов за одинаковый промежуток времени столько же атомов рождается, сколько и распадается. Необходимым условием для наступления такого радиоактивного равновесия является наличие „родоначальника“, первого элемента ряда, распадающегося настолько медленно, чтобы у нас, наблюдателей, создавалось впечатление процесса, не изменяющегося с течением времени.

Поэтому радиоактивные элементы располагаются в виде семейств, в которых радиоактивность, подобно наследственной болезни, переходит от поколения к поколению. Эту болезнь атом скрывает в себе в течение всей своей жизни, зато с тем большей мощью она проявляется в момент распада, когда выбрасывается довольно большая часть атома (α -частица), или меньшая (β -частица). Одновременно с выбрасыванием частицы

атом испускает γ -луч, до некоторой степени подобно тому, как звук сопровождает выстрел. Радиоактивный распад напоминает выстрел еще и в том отношении, что и сам распадающийся атом под влиянием „отдачи“ приходит в быстрое движение и откидывается в виде так называемого атома отдачи в сторону, противоположную направлению вылета его осколка.

α -частицы α -частицы заряжены положительно. Их заряд вдвое больше положительного заряда протона или отрицательного заряда электрона (так называемого элементарного заряда). После потери своей громадной скорости, которая в момент вылета достигает свыше 20 000 км/сек, они нейтрализуют свой положительный заряд, улавливая два электрона, и оказываются атомами гелия, что было показано спектральным анализом собранных в большом количестве нейтрализованных α -частиц. Гелий—второй после водорода по легкости элемент и принадлежит к числу редких газов, в небольшом количестве входящих в состав атмосферы. Гелий имеет громадное промышленное значение как газ для наполнения дирижаблей, так как он почти не уступает водороду в подъемной силе и вместе с тем совершенно не горюч. Атомный вес гелия, а следовательно и α -частицы, равен 4.

α частица представляет атом гелия, лишенный электронной оболочки, состоящей из двух электронов. Согласно высказанному нами выше правилу (число внутриядерных электронов = атомный вес — атомный номер), она состоит из четырех протонов и двух электронов. Как мы увидим в дальнейшем, ядро гелия (α -частица) представляет чрезвычайно прочное образование, которое не разрушается при самых мощных воздействиях. Атомный вес гелия, если говорить вполне точно, несколько меньше суммы весов четырех протонов и электронов: этот „дефект массы“, как мы видели, указывает на „прочность“ α -частицы, на то, что при образовании ее выделяется большое количество энергии, или, что то же, на то, что для ее разрушения нужно затратить громадное количество энергии.

Большая скорость испускаемых радиоактивными препаратами α -частиц наряду с их довольно значительной массой обуславливает большую живую силу, или кинетическую энергию, таких частиц. Этим и объясняется то, что почти исключительно эта форма радиоактивного излучения вызывает теплообразование, наблюдающееся у радиоактивных элементов.

β -частицы представляют не что иное, как электроны, которые выбрасываются из ядра с еще большей, чем у α -частиц, скоростью. Наиболее „жесткие“, т. е. быстрые, β -частицы некоторых радиоактивных элементов движутся со скоростью, близкой к скорости света (около 300 000 км/сек).

α - и β -распад Существует два основных типа радиоактивного распада: распад с выбрасыванием α -частицы

и с выбрасыванием β -частицы. Испускание γ -лучей, как явление вторичное, мы пока во внимание не принимаем. В первом случае масса распавшегося атома уменьшается на массу испущенной α -частицы (атомный вес падает на 4); таким образом, „новорожденный“ атом легче своего предшественника. Во втором случае изменение атомного веса, благодаря малой массе электрона, практически незаметно. Кроме того, при радиоактивном распаде изменяется заряд ядра, т. е. атомный номер, при чем при испускании α частицы он уменьшается на две единицы (потеря двух элементарных зарядов частицы), а при испускании β -частицы возрастает на единицу, так как при потере β -частицы, обладающей единичным отрицательным зарядом, один лишний положительный заряд в ядре оказывается нескомпенсированным.

Кроме характера испускаемых частиц, радиоактивное превращение характеризуется еще и своей быстротой. Обычно мерой этой быстроты служит тот промежуток времени, в течение которого распадается половина атомов данной порции элемента. Этот промежуток носит название времени или периода полураспада. По истечении следующего периода полураспада остается уже только четверть первоначального количества атомов; спустя третий период — только одна восьмая и т. д. Этот факт можно выразить и другими словами, сказав, что из данного числа атомов за секунду распадается определенная часть, и эта постоянная, определяющая темп распада, весьма различна для членов одного и того же семейства.

Таким образом, например, из биллиона атомов радия в секунду распадается приблизительно четырнадцать штук, а соответствующее скорости этого распада время полураспада измеряется для радия приблизительно 1600 лет. С начала нашей эры из грамма радия сохранилось бы до настоящего времени менее половины.

Ближайший „отпрыск“ радия — эманация, или радон — является благородным газом и притом наиболее тяжелым в группе элементов, которая начинается гелием. Радон распадается приблизительно в 150 000 раз скорее, чем радий, так что из миллиона его атомов в секунду распадается примерно два, а время его полураспада примерно равно четырем дням.

Существуют однако элементы более долговечные, чем радий, и менее долговечные, чем радон. Родоначальник семейства — уран — распадается в миллион раз медленнее радия, так что любое количество этого элемента для того, чтобы наполовину распасться, требует, четыре с половиной миллиарда лет, с другой стороны четвертый (считая от радона) продукт распада, радий С распадается настолько стремительно, что время его полураспада равно одной миллионной доле секунды.

Продолжительность жизни отдельных атомов радиоактивного элемента, как и у людей, колеблется в широких пределах

вокруг некоторого среднего значения (например, средний возраст, которого достигает атом радия, равен 2280 лет, т. е. на 700 лет превышает время полураспада). Среди атомов радона есть такие, которые распадаются уже в течение первой секунды с момента их рождения, а некоторые их сверстники переживают их на недели и даже месяцы. Однако такие атомы столько же редки, как столетние старики в мире людей.

Почти все радиоактивные вещества принадлежат к одному из двух семейств, родоначальниками которых являются уран и торий. Третье радиоактивное семейство, которое считалось ранее самостоятельным и по своему наиболее распространенному представителю было названо серией актиния, в результате позднейших опытов оказалось ответвлением серии урана. В самом деле, один из ее членов (уран II) распадается двойным путем: три процента его атомов превращаются в атомы очень быстро распадающегося элемента, названного „уран Y“, при распаде которого образуется протоактиний — родоначальник серии актиния, тогда как 97% урана II переходят в элемент ионий, продолжая основную линию семейства.

На рис. 6 представлена схема превращений семейства урана, при чем на нем изображена родословная только для основной ветви.¹ Каждый сорт атома отмечен ободком, внутри которого обозначено название соответствующего вещества, его атомный вес и заряд ядра (атомный номер). Число слева от квадрата показывает время полураспада, в течение которого половина всех атомов претерпевает превращение. Тип распада представлен обозначенными буквами α и β и штрихами, которые расположены справа у соответствующих квадратов. Длина штриха представляет в произвольном масштабе пробег частицы в воздухе, важную постоянную, о которой речь впереди.

Особого внимания заслуживают два последних члена семейства. Предпоследний (радий F) представляет собою не что иное, как чрезвычайно активный элемент, который был в свое время выделен супругами Кюри из основного уранового минерала — смоляной обманки — и назван полонием. Это „ α -излучающий“ элемент с относительно медленным распадом (период полураспада 137 дней), количество которого при радиоактивном равновесии относится к количеству радия, как соответствующие периоды полураспада, т. е. 137 дней к 1580 годам, и составляет не более одной четырехтысячной количества радия.

¹ Для простоты на этой схеме не отмечено, что в семействе урана в двух местах имеются разветвления. Так, небольшая часть атомов RaC переходит с α -излучением в элемент RaC', который в свою очередь, испуская β -излучение, распадается, образуя RaD. В дальнейшем под RaC мы будем понимать этот элемент вместе с обоими своими отпрысками.

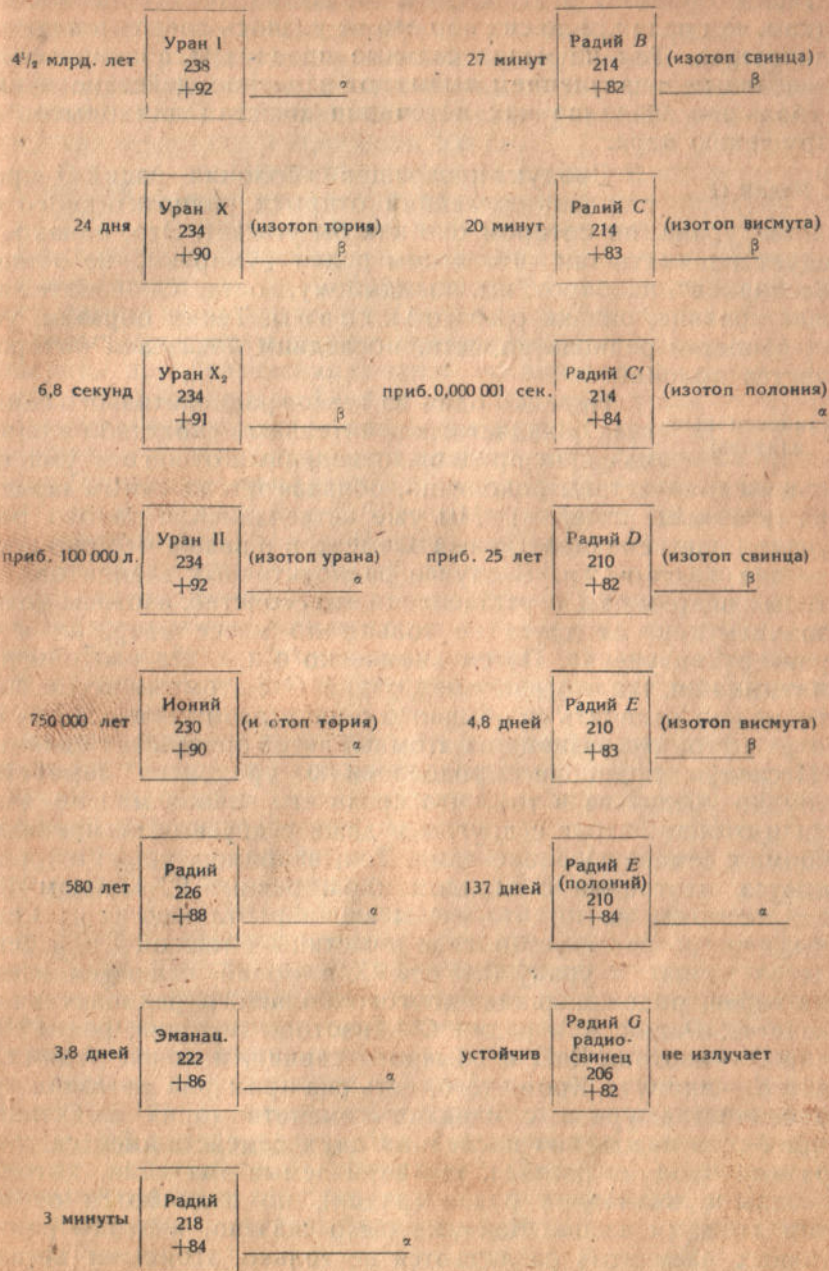


Рис. 6

Таким образом, этот элемент является значительно более редким, чем радий, и до сих пор его не удалось добыть в видимых количествах. Тем не менее сильные препараты полония своим интенсивным α -излучением вызывают заметное действие и имеют большое значение как источники α -частиц для опытов по разрушению ядра.

Радий G Продукт превращения полония—радий G—представляет последний отпрыск радиоактивного семейства урана, на котором оно как бы угасает. Это, однако, не следует понимать так, что атомы радия „умирают, не оставив наследников“, наоборот, им, повидимому, достается безмятежное существование, они не радиоактивны. Таким образом, угасает свойство радиоактивности, последним носителем которого является полоний.

Радиоактивные изотопы Нередко один из членов радиоактивного семейства обладает исключительным сходством с одним из своих предков, отделенным от него думя или большим количеством поколений, обладая тем же самым зарядом ядра (атомным номером). Мы уже встречались с такого рода случаями для нерадиоактивных элементов и знаем, что оно носит название изотопии. В случае радиоактивных элементов, для которых впервые было установлено это свойство, изотопы можно различить друг от друга не только по массе ядер, но и по характеру излучения. Путем химического анализа изотопы различить нельзя, так что, например, радий G с атомным весом 206,0 невозможно отличить от обычного свинца (атомный вес 207,2), несмотря на то, что разница их атомных весов превышает единицу.

Исследуя подробнее родословную уранового семейства, нетрудно убедиться в том, что среди его членов многие являются изотопами друг с другом и даже с другими не принадлежащими к семейству элементами. Так, например, уран I и уран II являются изотопами с зарядом ядра, равным 92 зарядам протона, несмотря на то, что массы их ядер отличаются на 4 единицы, что соответствует потере α -частицы с массой 4 при переходе от урана I к урану II. Уран X и ионий являются изотопами тория, родоначальника другого большого радиоактивного семейства. Радий A и радий C' — изотопы полония, радий B и радий D — изотопы RaG и обычного свинца, наконец радий C и радий E — висмута. Кроме того, есть ряд примеров изотопии членов семейства урана с членами семейств тория и актиния. Например, в каждом из последних двух семейств имеется газообразный продукт распада, так называемые эманации, которые изотопны с эманацией радия (радон), но отличаются от нее своим атомным весом. Как уже было сказано, изотопы радиоактивных элементов различаются не только атомными весами, но и характером распада.

Так, например, хотя все три эманации выбрасывают α -частицы, однако пробег этих частиц и скорость распада совершенно

различны. Так, например, эманация радия (радон) распадается наполовину за 38 дней и испускает α -частицы с пробегом 3,9 см, период полураспада для эманации тория (торон) измеряется всего 54 секундами, и пробег ее α -частиц 4,8 см; наконец, эманация актиния (актон) распадается наполовину ровно в 4 секунды, испуская α -частицы с пробегом 5,8 см.

Семейство тория во многом напоминает семейство урана. Его родоначальник — элемент торий, окись которого находит техническое применение в колпачках ауэровских газокатодных ламп, и распадается еще медленнее, чем уран. Время полураспада достигает для него шестнадцати миллиардов лет. Он превращается через два промежуточных продукта в вышеупомянутую эманацию тория (торон), продукты преобразования которой, по аналогии с серией урана, носят названия тория *A*, *B* и *C*. Они представляют изотопы соответствующих членов семейства урана (радий *A*, *B* и *C*) и подобны им по типу испускаемого излучения. Конечный продукт, торий *D*, по видимому не радиоактивен и представляет изотоп свинца, атомный вес которого (208) почти на единицу превышает атомный вес обычного свинца. Неактивный конечный продукт серии актиния также является изотопом свинца, однако его атомный вес до сих пор с точностью установить не удалось. Серия актиния аналогична семействам тория и урана еще и в другом отношении: ближайшие потомки эманации актиния (актона) — актиний *A*, *B* и *C* — являются изотопами соответствующих членов семейства урана и тория.

Необыкновенное сходство трех радиоактивных семейств, о котором мы только что говорили, позволяет сделать заключение о каком-то общем законе, которому удовлетворяет строение их ядер. Было сделано много попыток найти или, вернее, угадать этот закон, однако свойства радиоактивных семейств до последнего времени исчерпывающе не истолкованы.

Неоднократно также ставился вопрос и о том, действительно ли все другие вещества, не принадлежащие к радиоактивным семействам, не активны или может быть и они также перетерпевают распад, которого не удалось наблюдать только потому, что он идет слишком медленно. Все довольно многочисленные опыты, поставленные с этой целью, дали отрицательный результат, и только у двух элементов — щелочных металлов калия и рубидия — было установлено чрезвычайно слабое, но несомненное β -излучение.¹ Все же остальные элементы считаются в действительности неактивными, и их атомы не подвержены „естественной смерти“, т. е. превращениям

¹ В конце 1932 года установлено, что один из редкоземельных элементов — самарий — обладает α -радиоактивностью, а в начале 1933 года то же свойство открыто у одного из самых легких элементов — бериллия.

в другие. О „насильственной смерти атомов“, т. е. о разрушении ядер ударом посторонних частиц, речь будет идти ниже.

Что может дать исследование явлений радиоактивности?

Несмотря на то, что явления радиоактивности дали, пожалуй, самые первые и в то же время наиболее важные сведения о строении атомного ядра, несмотря на то, что в течение почти двадцати пяти лет (с 1896 по 1919 г.) все исследования атомного ядра были посвящены изучению явлений радиоактивных превращений и тех типов излучения (α , β и γ), которыми они сопровождаются, — все же в понимании самой сущности радиоактивных превращений исследователи ядра не добились еще решающих успехов. Прежде всего, до сих пор не только не создана исчерпывающая теория радиоактивности, которая смогла бы дать ответ на вопрос о том, что такое радиоактивность — болезнь, которой болеют только избранные атомы, и как она связана с внутренним строением ядра; лишь за последнее пятилетие стали намечаться пути к созданию этой теории.

Помимо создания общей теории радиоактивных явлений существует еще ряд первоочередных задач, которые стоят „в порядке дня“ исследований радиоактивности. К ним принадлежит в первую очередь вопрос о происхождении γ -лучей. Рассказывая о радиоактивных превращениях, мы умышленно не задерживались на γ -излучении, так как изучение его находится еще в совсем зачаточном состоянии, и только в течение последних года-двух вопрос этот начинает приобретать некоторую ясность. Вот эти проблемы (и еще ряд других) назрели и стоят на очереди, и в их разрешении за самое последнее время намечается несомненный сдвиг. Значение указанных задач настолько велико, что на них есть смысл остановиться несколько подробнее.

Применение к ядру волновой механики

Период с 1926 г. ознаменовался крупными событиями на фронте теоретической физики. К этому году противоречия между так называемой классической механикой и электродинамикой, которые до начала двадцатого века считались единственной основой всей теоретической физики, и теорией квант, которая была создана для объяснения ряда явлений, не укладывавшихся в рамки классической теории, — достигли максимальной остроты. Мало того, обнаружилась полная несостоятельность квантовой теории в ряде проблем, перед разрешением которых она оказалась столь же беспомощной, как и классическая электродинамика.

На смену обеим старым теориям ряд передовых теоретиков Запада (де-Брольи — Франция, Шредингер — Швейцария и Гейзенберг — Германия) в разных формах выдвинули новую теорию — новую квантовую механику (по Гейзенбергу) или волновую механику (по Шредингеру).

К сожалению, здесь нам нельзя остановиться даже на основных принципах этих теорий: это завело бы нас слишком далеко; достаточно указать на то, что приложение новой теории к ряду сложнейших вопросов современной физики увенчалось полным триумфом. Новые теории обросли мощным математическим аппаратом и пронизали всю физику сверху донизу, перевооружив ее работников, занятых не только основными, но и второстепенными, во всяком случае не центральными задачами.

Совершенно естественно, новая волновая механика была применима и к разрешению центральной задачи современной физики — задачи строения атомного ядра. Пионером в этом деле был молодой советский физик Гамов, которому принадлежит тот эскиз теории строения ядра, который является пока единственной попыткой теоретического обоснования явлений радиоактивности. Для понимания основных положений теоретических построений Гамова необходимо разобраться в понятии „потенциального барьера“, которое играет важнейшую роль в теории множества физических явлений и, в частности, ряда ядерных процессов.

Атомное ядро, как мы знаем, обладает положительным зарядом. Вследствие этого на приближающуюся к ядру положительную частицу будет действовать сила отталкивания, обнаруживающаяся между всякими одноименно заряженными телами. По мере приближения к ядру эта сила будет возрастать. Положительная частица, приближаясь к ядру, совершает работу, которая идет на увеличение ее потенциальной энергии. С этой точки зрения приближение положительного заряда к ядру можно уподобить вкатыванию тяжелого шарика вверх по откосу холма, который по мере приближения к вершине становится все более и более крутым.

С другой стороны, мы знаем, что ядра, состоящие из положительно и отрицательно заряженных частиц и обладающие суммарным положительным зарядом, за исключением ядер радиоактивных элементов, являются устойчивыми. Даже радиоактивные ядра в течение некоторого (для некоторых радиоактивных веществ — даже очень длительного) промежутка времени существуют, не разваливаясь. Если бы на положительную частицу, приближающуюся к ядру вплоть до самого его центра, продолжала действовать сила отталкивания, то ядро не могло бы быть устойчивым, ибо протоны или α -частицы, из которых состоит ядро, были бы вытолкнуты из него этой силой.

Остается допустить, что где-то (повидимому, на очень малом расстоянии от центра ядра) силы отталкивания для положительных частиц сменяются силами притяжения; другими словами: положительная частица, совершая все время работу против сил отталкивания (ее потенциальная энергия все время растет), вблизи от центра ядра должна почувствовать силу притяжения,

которая потащит ее внутрь ядра, при чем теперь уже эта сила будет совершать работу, ускоряя частицу, так что потенциальная энергия ее будет снова убывать по мере ее приближения к центру ядра.

Возвращаясь к нашей механической аналогии, мы можем сказать, что тяжелые шарики (положительные заряды), из которых состоит ядро, не могли бы находиться в равновесии на вершине холма, если бы там не было ямки, отделенной от склона холма возвышающейся кромкой (барьером). Роль гребня этого барьера в случае ядра играет та область, где сила отталкивания, действующая на приближающуюся к ядру положительную частицу, сменяется силой притяжения. Согласно прежних представлений, такой барьер является совершенно непроходимым для всех частиц, энергия которых меньше высоты барьера; α -частицы и другие составные части ядра защищены от внешнего пространства „запретной зоной“, проход через которую невозможен. Отличие волновой механики от классической в данном вопросе заключается в том, что она допускает возможность прохождения частиц через этот барьер.

По модели Гамова составные части ядра связаны внутри барьера значительными силами притяжения, природа которых неизвестна; однако для них сохраняется некоторая „надежда“ вырваться из своего заключения. Частицы обладают некоторой вероятностью проскочить через стену, отделяющую их от внешнего мира, при чем эта вероятность быстро растет с увеличением энергии частиц. Это представление оказалось чрезвычайно ценным и послужило путеводной нитью для целого ряда успешных опытов, в частности оно впервые дало объяснение известному соотношению Гейгера и Нэттола между периодом полураспада и пробегом испускаемых α -частиц (чем менее долговечен атом, тем более быстрые частицы он испускает; это можно видеть хотя бы из таблицы радиоактивных превращений уранового семейства—рис. 6).

К сожалению, теория до сих пор была не в состоянии дать сколько-нибудь детальную картину строения ядра. Можно с довольно большой достоверностью предположить, что основные части ядра (электроны и протоны) внутри ядра в своем большинстве образуют α -частицы (образование из четырех протонов и двух электронов) и что только небольшая часть протонов и электронов остается необъединенной в α -частицы; однако с достаточной точностью говорить о числе электронов и протонов, „оставшихся за штатом“, не приходится, тем более что законы взаимодействия заряженных частиц, применимые на обычных расстояниях (немного превышающих размеры частиц), для ядра, представляющего собой необычайно „плотно упакованную“ группу частиц, совершенно неприменимы.

В частности, оказывается, что электрон внутри ядра ведет себя совершенно иначе, чем вне его, скажем—в перифериче-

ской части атома. Весьма возможно, что электрон „в свободном состоянии“ вовсе не может существовать внутри ядра, прилепляясь к протону или к еще более увесистой частице. Указания на существование нейтронов (частиц с массой протона, но лишенных его положительного заряда), на которых мы еще остановимся при описании опытов по искусственному разрушению ядра, в связи с этим представляют особенный интерес.

Несмотря на то, что законченной теории строения ядра на сегодняшний день еще не существует, удалось достичь ряда ценных результатов, пользуясь допущениями, основанными на указанном выше общем представлении о модели ядра. Например, Гамов делает ряд заключений, исходя из дефекта массы¹ атомов ряда легких элементов, ядра которых могут состоять только из α -частиц и электронов (атомный вес, кратный четырем), и находит, что силы, сдерживающие между собой составные частицы ядра, подобны силам, действующим в миниатюрной капле воды. В дальнейшем ему удалось выяснить условия устойчивости ядер с высоким атомным номером, откуда один шаг до окончательного выяснения природы радиоактивности. К несчастью, для построения количественной теории необходимо знать массы изотопов атомов ряда тяжелых элементов со значительно большей точностью, чем они сейчас известны, так что в этом пункте дальнейшее развитие теории зависит от темпов совершенствования техники эксперимента „взвешивания атомов налету“ (масс-спектрограф) и исследования молекулярных спектров, которые только и могут дать сведения о массе изотопов.

С другой стороны, волновая механика с успехом может быть применена к ядру при решении вопроса об испускании γ -лучей, при чем оказывается, что представления о „возбуждении“ и последующем испускании света, которое позволило разобраться в оптических свойствах атома, зависящих от его оболочки, в применении к атомному ядру помогает решить давно назревший вопрос о природе γ -излучения.

Уже давно стало известным, что γ -лучи, представляющие очень жесткие (т. е. высокочастотные) электромагнитные колебания, во многих отношениях сходные с жесткими рентгеновыми лучами, исходят из ядер и связаны с какими-то изменениями в их строении; однако истолкование сложных спектров γ -лучей, испускаемых радиоактивными элементами, было затруднено тем, что оставалось неизвестным происхождение γ -излучения: было неясно, вызвано ли оно внутриядерными электронами, протонами,

¹) Дефектом массы, как уже говорилось выше, называется разница в массе ядра и его составных частей, которая связана с внутриатомной энергией. Положительный дефект массы (масса ядра больше суммы масс, образующих его протоны и электроны) указывает на возможность получения энергии при распаде ядра.

α -частицами или, наконец, всем ядром, которое участвует в колебаниях как целое. В течение последних нескольких лет эта проблема подвергалась ожесточенной проработке, в результате которой стало очевидным, что ядерные γ -лучи связаны с возбуждением α -частиц и обуславливаются их переходом на более низкий уровень энергии. Подобно тому, как при испускании видимого света, ультрафиолетовых и рентгеновых лучей мы говорили о возбуждении атома („оттягивании“ электрона) и о возвращении атома в первоначальное положение с меньшей энергией (низший уровень энергии) и уподобляли испускание света звуковым колебаниям оттянутой и отпущенной струны,— в случае γ -излучения мы можем говорить о возбуждении ядра, при чем роль электрона в данном случае будет играть одна из внутриядерных α -частиц, при возвращении которой в нормальное положение (нормальный уровень энергии) будет происходить испускание γ -колебаний.

При решении вопроса о происхождении γ -лучей основные успехи дали два способа исследования: изучение длиннопробежных α -частиц радия С и тория С и точное измерение длины пробега α -частиц, испущенных другими элементами.

Повидимому, при испускании γ -лучей в ядре разыгрываются следующие процессы. Прежде всего из ядра выбрасывается один из его электронов (β -распад). Причина этого события пока остается неясной и является одной из основных задач дальнейшего исследования радиоактивных превращений. Испускание β -частицы „переворачивает вверх дном“ ядро, вызывая чрезвычайно существенные изменения в его строении. При этом некоторым из входящих в состав ядра α -частицам сообщается значительная энергия; эти α -частицы „выталкиваются“ на более высокий уровень энергии, и им представляются две возможности: или провалиться на свое первоначальное место, при чем избыток энергии испускается в виде γ -излучения, или, воспользовавшись своим новым уровнем как трамплином, проникнуть через потенциальный барьер, вырвавшись из ядра.

С этой точки зрения энергия выброшенных ядром длиннопробежных α -частиц, которую мы можем измерить, определяя пробег, т. е. расстояние, проходимое α -частицей в воздухе (об этом подробнее в следующей главе),— является мерой высоты того уровня энергии, на который была поднята α -частица при пертурбации в ядре, происшедшей вследствие β -распада. С другой стороны, однако, далеко не всякая „поднятая“ α -частица может покинуть ядро (по классической механике это не могла сделать ни одна из частиц, уровень которой ниже высоты барьера); громадное большинство возбужденных α -частиц бессильно падает внутрь ядра, испуская избыток энергии в виде γ -лучей. Таким образом, измеряя энергию γ -лучей, мы имеем другое мерило для высоты возбужденного уровня.

Исследование
длиннопробеж-
ных α -частиц
радия C и то-
рия C

Если изложенная точка зрения верна, то значения уровней энергии, вычисленные из энергии (пробега) α -частиц и энергии (частоты) γ -луча, должны совпасть. Эта проверка для длиннопробежных α -частиц радия C и тория C была проделана группой работников лаборатории Резерфорда (Уинн Уилльямс, Уорд, Льюис и сам Резерфорд), которые разработали с этой целью специальный, в высшей степени остроумный прибор для счета α -частиц с определенным пробегом, о котором речь ниже. Их исследование показало, что описанная картина возникновения γ -лучей в основном отвечает действительности. Избыток энергии для различных групп длиннопробежных α -частиц по сравнению с энергией „нормальной α -частицы“, вырвавшейся из возбужденного ядра, с достаточной точностью соответствуют энергиям нескольких наиболее жестких типов γ -излучения. Таким образом, эти опыты делают почти достоверным представление о том, что γ -лучи происходят от переходов одной или нескольких α -частиц с одного уровня на другой внутри возбужденного ядра.

Другое подтверждение высказанных представлений было найдено при исследовании так называемой „тонкой структуры“ α -частиц. Дело в том, что в большинстве случаев испущенные при радиоактивном распаде α -частицы обладают строго одинаковой энергией и, следовательно, могут пройти в воздухе (см. рис. 7) один и тот же путь (одинаковый пробег). Однако Розенблуму и Резерфорду совершенно различными способами удалось показать, что в некоторых случаях (торий C и эманация активия—актон) испускаемые α -частицы хотя и немного,¹ но все же различаются по скоростям, так что, например, в случае тория C испускается не одна, а пять групп α -частиц с различными скоростями. Это открытие может быть истолковано таким образом: при α -распаде, т. е. при разрушении ядра, выражающемся в выбрасывании α -частицы, может представиться два случая: или вся энергия распада расходуется на самый „выстрел“ в виде кинетической энергии α -частицы и оставшегося атома отдачи; или же α -частица увозит с собой только часть энергии, а часть ее идет на возбуждение ядра, т. е. на подъем одной из оставшихся в ядре α -частиц на более высокий уровень. Если это так, то существование нескольких групп α -частиц с различной скоростью указывает на то, что оставшиеся в атоме отдачи α -частицы поднимаются за различные уровни энергии, о величине которых можно судить по разностям энергий выброшенных α -частиц.

¹ Разделение групп α -частиц различной скорости лежит на пределе точности старых методов измерения энергии, откуда и название „тонкой структуры“ по аналогии с тонкой структурой спектральных линий, которая была установлена после значительного усовершенствования оптических методов.

Однако сейчас же возникает вопрос: куда девается энергия возбуждения ядра? Мы знаем, что возбужденная частица отдает свою энергию в виде излучения, и, следовательно, α -распад в данном случае должен сопровождаться испусканием γ -лучей с энергиями, соответствующими разности энергий выброшенных α -частиц. Опыт в одном случае (актон) уже подтвердил это предположение. Тем самым под изложенное представление о процессе испускания γ -лучей подведено еще одно опытное подтверждение.

Прежде чем оставить вопрос о происхождении γ -лучей необходимо подчеркнуть разницу в степени возмущения ядра,

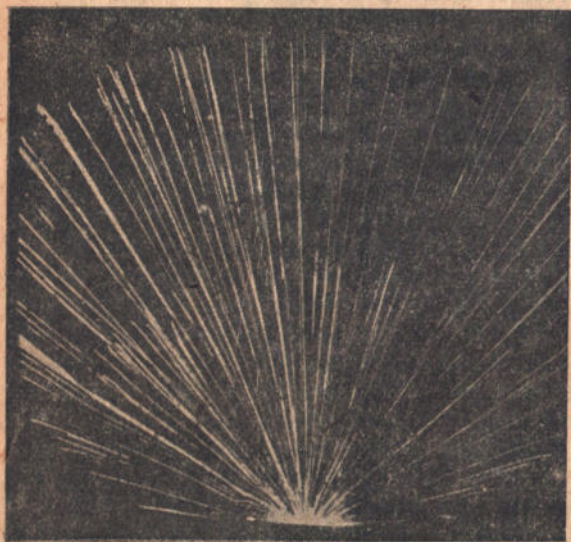


Рис. 7

вызванного испусканием α и β частицы. Странно сказать, но вылет α -частицы или вовсе не вызывает возбуждения ядра или вызывает подъем одной из оставшихся в ядре α -частиц на сравнительно невысокий уровень. β -распад же нередко вызывает жесточайшее возбуждение ядра, при чем α -частицы поднимаются на очень высокие уровни и испускаются чрезвычайно жесткие γ -лучи. Эта разница чрезвычайно удивительна и, вероятно, непосредственно связана с про-

цессом, являющимся причиной β -распада ядра.

Наши теоретические представления наталкиваются на серьезные трудности, когда мы их пытаемся применить к электронам в ядре. Пожалуй, наиболее удивительным в этом отношении является то обстоятельство, что β -излучающие ядра испускают электроны с самой различной энергией, и нет никаких указаний на существование процессов, на которые могла бы расходоваться часть их энергии. Таким образом, существование β -частиц со всевозможными значениями энергии противоречит основным законам квантовой механики, согласно которым можно было ожидать, что все β -частицы обладают в ядре строго определенной энергией и должны поэтому выбрасываться с одинаковой скоростью (как, например, для α -частиц). Пожалуй, эта проблема, как и вообще весь процесс β -распада, является на сегодняшний день самой основной задачей в изуче-

нии радиоактивных явлений, но от ее решения мы еще довольно далеки.

До последнего времени считалось общепризнанным, что поглощение веществом рентгеновских и γ -лучей происходит исключительно в электронной оболочке атома и что ядро в этих процессах никакой роли не играет. Однако за последние полтора года рядом ученых разных стран,¹ независимо друг от друга исследовавших действие очень жестких γ -лучей на атомы, удалось показать, что это представление неверно и что очень жесткие γ -лучи частично поглощаются именно ядром, которое подобно электронной оболочке для случая видимых, ультрафиолетовых и рентгеновых лучей приводится при этом в возбужденное состояние и вслед за поглощением испускает избыточную энергию в виде γ -лучей с иной частотой, чем у излучения, вызвавшего возбуждение.

Тарант и Гэпфильд в недавно опубликованной работе сообщают результаты исследования с целым рядом элементов. Они установили, что жесткие γ -лучи, испускаемые торием С и радием С, вызывают возбуждение ядер всех элементов от кислорода до свинца. Особенно удивительно, что все исследованные элементы при возбуждении испускают вторичные лучи одной и той же частоты. Это можно объяснить только тем, что первичные γ -лучи, падая на ядро, возбуждают не все ядро в целом (которое для различных элементов построено по-разному), а какую-то его часть, одинаковую для всех исследованных элементов. Весьма вероятно, что при этом происходит возбуждение самих α -частиц, и наблюдаемое излучение — не что иное, как результат колебаний отдельных составных частей α -частицы (четырёх протонов и двух электронов). Если это так, то явление возбуждения ядер дает в руки физиков чрезвычайно мощное орудие для исследования основных составных частей ядер всех элементов α -частиц.

К сожалению, дальнейшее развитие исследований в этом направлении встречает большие затруднения, так как нет достаточно мощных источников γ -лучей различной частоты. Несомненно, что создание искусственных источников мощного γ -излучения позволило бы значительно повысить темпы разрешения этой важнейшей задачи, благодаря чему проблема построения сверхвысоковольтных разрядных трубок, которую мы разберем в главе об искусственном разрушении ядра, получает особенную актуальность. Разрядная трубка на 2,5 миллиона вольт по количеству и мощности генерируемого в ней γ -излучения соответствует более чем килограмму радия. Учитывая, что количество радия ни в одном из крупнейших институтов мира не превышает нескольких грамм, а обычно при исследо-

¹ Чао—Япония, Мейтнер—Германия, Гэпфильд и Тарант — Англия.

ваниях пользуются еще значительно меньшими количествами, необходимо признать, что дальнейшее изучение процесса возникновения γ -излучения вообще и возбуждения ядра γ -лучами в частности должно развиваться на базе использования мощного излучения искусственных источников γ -лучей сверхвысоковольтных разрядных трубок.

Уже из короткого очерка результатов исследования явлений радиоактивности видно, как много дали эти исследования для наших представлений о строении ядер радиоактивных элементов. Однако этими сведениями далеко не исчерпывается тот сдвиг в исследовании строения ядра, который обязан изучению радиоактивных элементов и их излучения. До последних месяцев α -частицы, испускаемые при распаде ядер, служили почти единственным орудием исследования ядер нерадиоактивных элементов. α -частицы, единственные из имевшихся в распоряжении исследователя быстро несущихся частиц, обладали энергией, достаточной для того, чтобы „вплотную“ подойти к ядру, преодолевая громадные электрические силы („потенциальный барьер“), защищающие сердце атома от посягательств экспериментатора. Ураганная бомбардировка миллиардов нейтральных атомов миллионами α -частиц приводит к немногочисленным, но зато чрезвычайно поучительным по своим результатам попаданиям последних в ядра элементов, при которых происходит резкое отклонение частиц от своего пути или даже прорыв α -частицы сквозь потенциальный барьер с последующим взрывом пораженного ядра. Для того, чтобы разобраться в том богатом и разнообразном материале, который был получен в результате экспериментов по бомбардировке атомов α -частицами, нужно прежде всего понять, каким образом исследователи научились „видеть“ результаты такой бомбардировки; задача нелегкая, если принять во внимание, что размеры атомов во много раз мельче тех мельчайших частиц, которые могут быть видны в сильнейшие микроскопы.

IV. КАК ВИДЯТ НЕВИДИМОЕ

Размеры атомов

Самые малые частицы, которые может различить невооруженным глазом человек с очень острым зрением, не меньше одной сотой миллиметра. С помощью самого мощного микроскопа можно видеть темные частицы диаметром около пятнадцати миллионных долей миллиметра. Наконец, ультрамикроскоп позволяет установить расположение (но не форму) частиц размером около двух миллионных миллиметра. Атомы имеют размеры около двух стомиллионных миллиметра, а ядро (подробнее об этом

ниже) по размерам меньше одной биллионной миллиметра

$$\left(\frac{1}{1\,000\,000\,000\,000} \text{ мм} \right).$$

Как же можно проследить за поведением отдельной частицы, которая лежит далеко за пределами разрешающей силы самых мощных микроскопов? Никак, если речь идет о частице, обладающей незначительной энергией.

Однако мы знаем, что частицы, выбрасываемые из ядра при радиоактивном распаде, как-раз обладают громадной энергией, и, пользуясь действиями этой энергии, мы можем обнаружить не только место пребывания отдельных частиц, но и проследить весь путь их полета и их разрушающие действия. Основные два метода, позволяющие „видеть“ действие отдельных частиц, это: метод сцинтилляций и экспансионной камеры Уильсона:

Сцинтилляции Не приходилось ли Вам рассматривать часы, стрелки и цифры которых покрыты краской, светящейся в темноте? Если да, то вы имели возможность „видеть α -частицы“. В самом деле, рассматривая в лупу поверхность, покрытую светящейся краской (для успеха опыта необходимо в течение некоторого времени дать отдохнуть глазам в темноте), мы замечаем, что казавшееся невооруженному глазу равномерным зеленоватое сияние краски, похожее на мерцание светляка, в действительности состоит из громадного количества светящихся точек, которые повсюду то вспыхивают, то гаснут, представляя в миниатюре нечто в роде дождя падающих звезд. Подобно тому, как вспышка каждого метеора в небе есть результат попадания в земную атмосферу „снаряда из мирового пространства“, который в силу трения о воздух при своем торможении раскаляется добела и почти всегда сгорает, не долетев до поверхности,—наши искорки, или „сцинтилляции“, являются тоже результатом попадания снаряда, только снаряда совсем другого типа. Они вызываются ударами снарядов из мира атомов о мельчайшие кристаллики сернистого цинка, основной части светящейся краски, возникая при торможении α -частиц с громадной скоростью за счет превращения части их энергии в свет.

Взгляд в лупу показывает нам действие отдельных атомов или вернее их осколков, выбрасываемых при распаде радиоактивного вещества. ¹

¹ Необходимо отметить, что не все светящиеся в темноте краски обязаны своим свечением действию α -частиц.

Ряд светящихся (фосфоресцирующих) веществ светится благодаря тому действию, которое оказывает на его молекулы свет. Такие вещества должны быть предварительно освещены ярким светом, после чего они светят и в темноте, при чем это свечение более или менее быстро исчезает с течением времени. Другие вещества светятся благодаря происходящим в них химическим реакциям (гнилушки, белый фосфор и др.).

Такое вещество и должно быть, хотя бы в минимальном количестве, примешано в светящуюся краску для того, чтобы появилось свечение; испущенные им α -частицы, налетая со скоростью от пятнадцати до двадцати тысяч километров в секунду на кристаллики сернистого цинка, вызывают кратковременную вспышку последних.

Спидтарископ Явление сцинтилляций было впервые наблюде-
дено в 1903 г. Круксом и Эльстер и Гейтелем. Круксом был предложен простой приборчик, названный им спидтарископом, с помощью которого можно наблюдать



Рис. 8

световое действие отдельных α -частиц. Спидтарископ (рис. 8) представляет собой небольшую трубку, в одном из концов которой укреплено острие *A*, покрытое веществом, испускающим α -лучи; в нескольких миллиметрах от него находится прозрачный экран *E* (из стекла или слюды), покрытый тонким слоем кристаллического сернистого цинка. В другом конце трубки закреплена линза *L*, через которую можно наблюдать экран. В темной комнате экран виден как темный фон, на котором там и сям вспыхивают, чтобы мгновенно погаснуть, светящиеся точки. Этот прекрасный опыт вызывает даже у неподготовленного наблюдателя представление о том, что радий бомбардирует экран потоком снарядов, вызывающих световые вспышки экрана. Подобное явление

наблюдается и в некоторых сортах алмаза, но в них сцинтилляции значительно слабее, чем в сернистом цинке.

Счет α -частиц Регенеру (1908) принадлежит идея использовать явление сцинтилляций для счета α -частиц, падающих на экран. Для этой цели экран наблюдают через микроскоп с увеличением 20-30 и возможно большей при таком увеличении светосилой. Эксперименты со счетом α -частиц необходимо производить в совершенно темной комнате, при чем глаз экспериментатора должен приобрести максимальную чувствительность, для чего нужно привыкать в продолжении около получаса в темноте.

Некоторое представление о сцинтилляциях при наблюдении экрана в микроскоп дает рис. 9.

Наблюдение, а в особенности счет сцинтилляций, чрезвычайно утомляют наблюдателя. Достаточно указать, что несмотря на то, что счет ведется периодами по 0,5 — 1 минуте с перерывами в несколько минут, все же после счета в течение часа-полутора чувствительность глаза наблюдателя и напряжение его внимания резко падает, при чем утомление настолько сильно, что некоторые специалисты по радиоактивным измерениям (венцы Петер-

сон и Кирш) считают, что один наблюдатель может заниматься счетом сцинтилляций не чаще двух раз в неделю.

Методом счета α -частиц по их сцинтилляциям широко пользовались и пользуются многие исследователи. Несмотря на многие свои недостатки (утомительность, большая трата времени, субъективность), он обладает рядом больших достоинств, являясь методом чрезвычайно деликатным и мощным. С его помощью разрешались такие важнейшие вопросы, как определение числа α -частиц, испускаемых определенной массой радиоактивного вещества, счет протонов, вызванных столкновением α -частиц с атомами водорода или выбитых ими из ядер легких элементов и др.

Как мы увидим дальше, можно вести счет α -частиц и с помощью электрических счетчиков, однако метод сцинтилляций до последнего времени выдерживал их конкуренцию в виду того, что в электрических счетчиках очень трудно отделаться от влияния β - и γ -лучей, которые регистрируются обычно с таким же успехом, как и α -частицы; метод же сцинтилляций позволяет считать именно α -частицы или протоны, так как экраны из сернистого цинка очень слабо реагируют на воздействия β - и γ -лучей, давая отдельные вспышки только в случае α и H частиц¹.

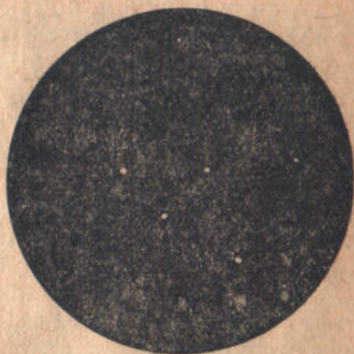


Рис. 9

По этой-то причине метод сцинтилляций оказал неоценимые услуги при экспериментах, посвященных выяснению законов рассеивания α -частиц ядрами, а также процессов искусственного разрушения ядер при попадании в них α -частиц большой скорости.

Подобно γ - и β -лучам, α -частицы также в состоянии проникать сквозь вещество, однако они значительно легче задерживаются, нежели указанные типы излучения. В то время как „жесткие“ β -лучи могут быть замечены после прохождения через слой металла толщиной в несколько миллиметров, а наиболее проникающие из γ -лучей в достаточном количестве проходят через дециметровую свинцовую броню, α -частицы задерживаются несколькими сантиметрами воздуха. Так, например, α -частицы радия C' — наиболее быстрые из α -частиц, испускаемых элементами уранового семейства, — проходят в воздухе нормальной плотности ровно 7 см. Те же частицы

Пробег
 α -частиц

¹ H -частицами иногда называют очень быстро движущиеся протоны.

полностью задерживаются листком слюды толщиной в 0,04 мм, о котором поэтому говорят, что он обладает „воздушным эквивалентом в 7 см“. Пробег α -частиц в воздухе связан с их скоростью соотношением, установленным Гейгером, согласно которому пробег пропорционален кубу скорости. Для каждого определенного радиоактивного элемента скорость всех испускаемых α -частиц одинакова (если не говорить о „тонкостях“ структуры α -излучения, о которых мы упоминали в конце прошлой главы и которые наблюдаются у очень немногих радиоактивных элементов).

Однако при переходе от элемента к элементу скорости α -частиц меняются: чем быстрее распадается элемент, тем больше скорость продуктов распада α -частиц. Это правило Гейгера и Нэттола, которое находит некоторое обоснование в теории Гамова о строении ядра (см. предыдущую главу), подтверждается рис. 6 (семейство урана), из которого мы видим, что α -частицы медленно распадающегося урана I обладают пробегом в 2,7 см (скорость около 14 000 км/сек), тогда как очень быстро распадающийся радий C' дает частицы, пробег которых, как уже указывалось, равен 7 см, а еще менее долговечный торий C' выбрасывает α -частицы с первоначальной скоростью в 20 600 км/сек с пробегом в 8,6 см.

Путь α -частиц в воздухе в большинстве случаев до самого своего конца представляет прямую линию. Зная число молекул (атомов) газа в кубическом сантиметре и размер этих молекул, мы можем при помощи основных представлений молекулярной физики подсчитать число столкновений, которые должна перетерпеть α -частица на своем пути в газе. Оказывается, что на своем семи-сантиметровом пути α -частица радия C в воздухе должна повстречать несколько сотен тысяч атомов содержащихся в воздухе газов (преимущественно кислорода и азота).

Если бы эти встречи проходили так же, как и обычные столкновения атомов, являющиеся результатом непрерывного беспорядочного теплового движения, то уже после первого удара α -частица была бы упруго отброшена назад и передала бы значительную часть энергии „подбитому“ атому. В действительности же α -частицы сохраняют первоначальное направление своего полета и только постепенно утрачивают свою скорость, что с несомненностью указывает на иной характер столкновения: именно, что α -частицы пролетают сквозь атомы, подобно тому, как бильярдный шар прорвался бы сквозь паутину, опутавшую бильярд.

Атомы при ударах обычной силы ведут себя, как упругие частицы, однако мощному налету α -частиц они противостоят не могут, и эти частицы на своем пути пробуравливают сотни тысяч атомов, почти не встречая сопротивления.

Однако атомы при этом не остаются совершенно нетронутыми. Обычно пролетающая через атом α -частица вырывает один из

электронов оболочки, при чем сам атом становится положительным ионом. Таким образом частица производит на своем пути десятки тысяч ионов и в силу этого делает газ проводящим.

На эти повторные ионизации α -частица расходует постепенно кинетическую энергию своего стремительного полета. Скорость ее по мере движения в газе уменьшается и, наконец, α -частица утрачивает свою способность прямолинейно пролетать сквозь атомы, „не обращая на них внимания“. Прямолинейный путь понемногу вырождается в зигзагообразный, и скорость уменьшается до величины нормальной для обычного теплового движения газовых молекул. Одновременно с этим перерождается и самая α -частица, утрачивая сперва один, а потом и второй из своих положительных зарядов, путем захвата двух недостающих электронов в свою оболочку от окружающих атомов, при этом α -частица становится „заурядным атомом“ гелия.

Способность α -частиц производить ионизацию на своем пути сквозь воздух или другие газы сделала возможной разработку ряда электрических методов, с помощью которых можно обнаруживать и считать α -частицы и которые будут нами разобраны ниже.

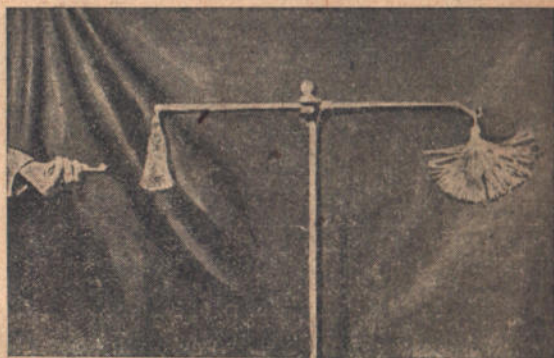


Рис. 10

На рис. 10 представлен хорошо известный опыт, наглядно показывающий ионизирующее действие α -частиц. Две шелковые кисточки, заряженные приблизительно до тридцати тысяч вольт, так что их волоски расталкиваются в разные стороны силой электростатического взаимного отталкивания одинаковых зарядов, подвешены на изолирующей подставке. Так как воздух при обычных условиях является исключительно хорошим изолятором,—заряд с кисточек стекает очень медленно.

Однако, если к одной из них поднести даже очень слабый препарат радия (как показано на рисунке), то созданная им ионизация оказывается совершенно достаточной для мгновенного стекания заряда кисточки через газ, при чем волоски кисти мгновенно спадают.

Ионизирующей способностью α -частиц объясняются также явления сцинтилляций, действие α -частиц на фотопластинки и вообще методы регистрации и счета α -частиц.

Обнаружение
путей α -
частиц

Возможность с помощью сцинтилляций установить хотя бы одну точку пути α -частицы, именно его конечную точку, в которой, наткнувшись на экран, α -частица почти сразу теряет свою скорость,

представляет большую победу экспериментальной физики, однако „увидеть“, проследить весь путь частиц — задача еще более заманчивая, более трудная, дающая более совершенный метод исследования в руки экспериментаторов. Первые попытки в этом направлении основывались на непосредственном фотографическом

Фотографическое действие
 α -частиц

действии α -частиц и сводились к следующему: небольшая крупинка радиоактивного вещества, испускающего α -частицы, помещалась на светочувствительный слой фотопластинки, которая по истечении некоторого промежутка времени подвергалась нормальному проявлению.



Рис. 11

Рассматривая обработанную таким образом пластинку под микроскопом с достаточным увеличением, можно заметить (рис. 11) след расходящихся путей α -частиц. Этот способ не решает, однако, вопроса о наблюдении путей α -частиц. В самом деле, наряду с техническим несовершенством таких „радиограмм“ (пути получаются в виде пунктирных линий, из-за того, что при боль-

ших увеличениях заметно, что светочувствительный слой состоит из отдельных зерен), такого рода регистрация путей требует обязательного применения фотопластинок, микроскопа и т. д., а кроме того позволяет заметить следы путей только в одной определенной плоскости — светочувствительном слое фотопластинки. Говоря по существу, метод радиограмм пригоден только для иллюстрации характера движения α -частиц, но не для какого-либо детального изучения или исследования процессов, сопровождающих пронизывание ими слоя вещества.

Конденсация
воды на ионах

Принцип прибора, который позволяет с гораздо большим удобством наблюдать (даже без помощи фотографии) пути отдельных частиц, принадлежит Уильсону и предложен им около 1893 г. Вскоре после откры-

т

тия электронов этот ученый сделал предположение о том, что эти мельчайшие частицы электричества играют какую-то роль в процессе образования облаков во влажном воздухе. Наблюдения показывают, что облака образуются неправильно. Чем это вызвано? Почему, если влажный воздух в атмосфере достаточно сильно охлажден, не происходит мгновенное превращение его водяного пара в капельки воды (образование облака) и притом сразу во всем объеме, занятом охлажденным до надлежащей температуры водяным паром.

Оказывается, что молекулы воды, находящиеся на месте будущего облака, ведут себя незадолго до начала его образования до некоторой степени подобно знаменитому Буриданову ослу или разумному животному Аристотеля.

Аристотель предложил представить себе совершенно разумное животное, сидящее точно в центре круга, по окружности которого, на равных расстояниях, расположены одинаковые порции одной и той же пищи, употребляемой данным животным, и пришел к заключению, что животное, если оно действительно вполне разумно, издохнет с голоду в середине круга, так как не существует причин, по которым оно избрало бы какую-нибудь одну из порций пищи, раз все эти порции одинаково велики и вкусны и одинаково отдалены от центра круга. Равная притягательная сила ко всем порциям удерживала бы несчастное животное в центре круга, подобно тому, как натяжение велосипедных спиц удерживает втулку в центре колеса. Разумеется, ни один голодный человек, а тем более зверь, не выдержал бы такого „испытания разумности“ и двинулся бы, может быть после мгновенного колебания, к одной из порций пищи.

Однако молекулы воды, которые в переохлажденном паре находятся в аналогичном состоянии, в течение некоторого времени способны себя вести подобно разумному животному Аристотеля. В чистом влажном воздухе облака не образуются мгновенно после того, как достигнута состояние насыщенного пара; наблюдается пересыщение, при чем молекулы воды, испытывая одинаковое притяжение со стороны своих ближайших соседей, в течение некоторого времени как бы колеблются в выборе места для образования капли. Наличие пыли или электрических зарядов в воздухе облегчает образование первых капель. Отдельные хлопья, наблюдаемые в первой стадии образования облака, указывают на существование центров конденсации, т. е. точек, где образование первых капель почему либо облегчено.

Заслуга Уильсона состоит в том, что он первый поставил вопрос, не могут ли быть электроны (или ионы) такими центрами конденсации. В действительности, дело так и обстоит. Элементарные заряды способствуют конденсации, которая, раз начавшись, быстро развивается, давая по капельке воды на каждом имеющемся в газе ионе. Между прочим, на этом свойстве были

основаны многочисленные попытки искусственного ускорения дождя (распыление заряженного песка с аэроплана), из которых некоторые дали настолько многообещающие результаты, что их можно считать первыми успехами в решении проблемы „управления погодой“.

Уильсон проверил свои идеи практически в Кавендишской лаборатории (Кембридж), где ему сразу же удалось получить осаждение мельчайших капелек воды на отдельных ионах и таким образом путем оригинального „увеличения“ установить расположение частиц атомных размеров.

Конденсация
воды на путях
 α -частиц

Однако на этом он не остановился, применив метод конденсации к „проявлению“ путей быстрых частиц, выброшенных из ядра при радиоактивном распаде. Как мы уже видели, α -частица, пронесшись через газ, оставляет на своем пути цепочку положи-

тельных и отрицательных ионов, которые затем, конечно, разбрасываются тепловым движением и мало-по-малу вновь соединяются друг с другом, образуя нейтральные молекулы. Если пропустить α -частицу через пространство с пересыщенным паром, то на ионной колонне, оставленной на пути частицы, начнется конденсация воды, и в течение некоторого времени мы будем видеть как бы след движения частицы.



Рис. 12

Пользуясь этим принципом, Уильсон в 1911 г. получил прекрасные фотографии путей частиц и тем самым дал в руки физиков один из наиболее мощных методов исследования радиоактивных явлений. Фотографии Уильсона могут быть сопоставлены с величайшими художественными произведениями, так как они представляют собой одно из крупнейших проявлений экспериментального искусства. На фотографиях Уильсона (рис. 12) отчетливо видны пути не только α -, но и β -частиц, причем последние не такие „жирные“ (меньшая ионизирующая способность β -частиц) и значительно более извилистые (меньшая масса). Пути быстрых β -частиц представляют как бы цепочку из отдельных капелек (рис. 13), по числу которых (по фотографии с достаточным увеличением) можно непосредственно сосчитать число ионов, произведенных β -частицей на ее пути. Фотографии путей α -частиц представляют, как правило, почти правильную прямую (рис. 14), на которой, однако, подчас заметны резкие



Рис. 13



Рис. 14



Рис. 15

изломы, которые являются результатом столкновения частицы с ядром атома, попавшегося на пути (рис. 15).

Камера Уильсона Пересыщение воздуха водяным паром достигается во всех случаях наблюдения путей частиц с помощью внезапного расширения газа в пространстве с насыщенным паром. Внезапное расширение сопровождается кратковременным охлаждением, которое является причиной выпадения тумана на ионах, образовавшихся от пролета частицы. Задача заключается в том, чтобы фотографирование было произведено строго в надлежащий момент, спустя очень короткий промежуток времени после расширения камеры, занятой паром, пока „пути“ частиц еще не „расплылись“.

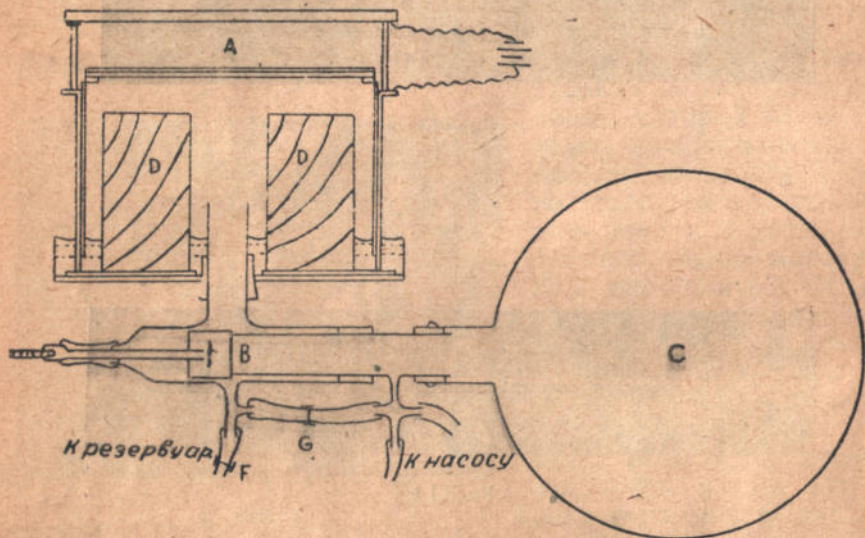


Рис. 16

Конструкция камеры, с которой работал Уильсон, приведена на рис. 16. Закрытая толстым стеклом цилиндрическая камера *A*, диаметром в 16,5 см и высотой в 3,4 см представляет собой пространство, в котором получают пути частиц. Расширение достигается поворотом вентиля *B*, который сообщает пространство „под полом“ камеры с сосудом *C*, из которого предварительно удален воздух насосами (через специальную трубку, указанную на рисунке). При открывании вентиля „пол“ камеры внезапно опускается до упора на резиновую подкладку. Вентиль *B* управляется с помощью маятника, который одновременно вызывает разряд мощной конденсаторной батареи через трубку с ртутным паром, где получается яркая вспышка, освещающая пространство внутри камеры настолько интенсивно, что получившиеся пути запечатлеваются на пластинке фотоаппарата, на

веденного на внутренность камеры через стекло, которым она закрыта сверху.

Камера все время наполнена насыщенным паром воды, так как ее крышка и дно покрыты тонким слоем влажного желатина. Между „потолком“ и „полом“ камеры создается электрическое поле (батарея), служащее для того, чтобы высадить ионы, образовавшиеся в камере, и почистить ее для следующего опыта. При точной регулировке промежутка времени между расширением и вспышкой (фотографированием) эта камера позволяет получить прекрасные фотографии, подобные приведенным на рис. 12—15.

Различные исследователи разработали очень большое количество камер, отличающихся от камеры Уильсона только конструктивными деталями, но основанных на том же принципе. Из этих многочислен-

Автоматическая камера Шимицу

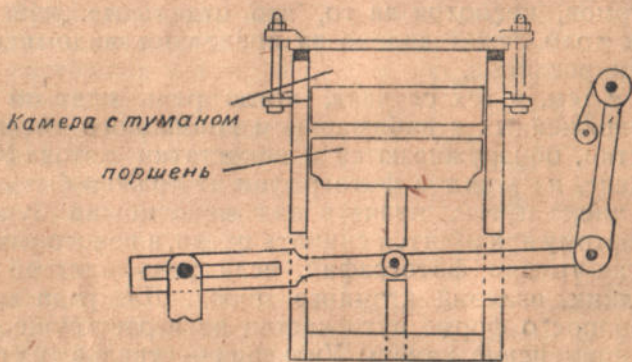


Рис. 17

ных конструкций стоит отметить тип автоматической камеры, предназначенной для получения серий фотографий. При исследовании редких явлений, каково единичное рассеяние α -частиц (излом прямолинейного пути при столкновении с ядром) и разрушение ядра при прямом ударе α -частицы, нередко необходимо получить громадное количество фотографий, на которых среди сотен тысяч снятых путей окажется, может быть, всего несколько путей, на которых с α -частицей случилось „редкое событие“ — прямое столкновение с ядром.

Для этой цели Шимицу разработал простую конструкцию камеры, которая позволяет производить большое количество снимков последовательно. Устройство камеры показано на рис. 17. Точно пригнанный к цилиндру поршень качается в камере взад и вперед под действием мотора.

Хотя расширение камеры в этой конструкции не настолько внезапно, как в камере системы Уильсона, все же и в ней получаются прекрасные фотографии, если только позаботиться о том,

чтобы α -частицы впускались в камеру только непосредственно перед тем, как поршень займет свое крайнее положение (максимальный объем камеры). Если применять электрическое поле для очистки камеры от ионов, то она в состоянии работать через каждые несколько секунд.

При фотографировании путей частиц широко применяют одновременную съемку двумя фотоаппаратами под углом друг к другу; такая „стереоскопическая“ фотография дает несравненно более полное представление о путях α -частиц, тогда как одна фотокамера не показывает их пространственного расположения.

Камера Уильсона является одним из самых сильных приспособлений, применяемых при исследовании ядра. Особенно привлекателен этот метод своей исключительной наглядностью. В камере Уильсона мы действительно „видим“ следы катастроф в мире атомов, несмотря на то, что отдельные „действующие лица“ этих драм лежат далеко за пределами видимости самых сильных микроскопов.

Вместе с тем в тех случаях, когда речь идет об исследованиях, сопряженных с наблюдением громадного числа отдельных α -частиц, обнаруживаются и недостатки метода Уильсона. В самом деле, на каждой фотографии не должно быть слишком большого числа путей, иначе в них невозможно будет разобраться; поэтому приходится снимать сотни, в некоторых случаях даже многие тысячи фотографий, если речь идет об исследовании „редких явлений атомного мира“. Для ряда задач, при которых вопрос о форме пути частиц не играет существенного значения, применение камеры Уильсона — стрельба из пушек по воробьям. Метод сцинтилляций, с достоинствами и недостатками которого мы уже познакомились, тоже не особенно пригоден для исследования редких явлений, так как счет большого числа сцинтилляций требует очень длительного времени и представляет страшно кропотливое и утомительное занятие.

В вопросах, связанных с исследованием большого количества отдельных ядерных явлений, со счетом частиц и т. д., большим подспорьем являются получившие широкое распространение, в особенности за последние 5-6 лет, электрические счетчики частиц. В основе всех типов электрических счетчиков лежит „ионизирующая способность“ исследуемых частиц, т. е. то, что они на своем пути в газе образуют цепочку ионов.

Представим себе две металлических пластинки (или два вставленных друг в друга цилиндра), хорошо изолированных от земли (рис. 18). Включим последовательно с ними батарею аккумуляторов и очень чувствительный прибор для измерения тока. Так как воздух или другой газ, отделяющий друг от друга наши пластинки, при обычных условиях состоит из нейтральных молекул или атомов, наш при-

бор не обнаружит ни малейшего тока. Однако, как только вблизи нашего устройства, которое носит название ионизационной камеры, поместить радиоактивный препарат, чувствительный прибор (гальванометр или электрометр) покажет ток. Частицы, испускаемые радиоактивным препаратом, пролекая между пластинками, образуют на своем пути большое количество ионов, которые и переносят ток, замыкая ранее разомкнутую цепь. В таком исполнении наша схема пригодна для измерения токов в газах, созданных большим количеством попадающих внутрь камеры частиц. α и β -частицы, попадающие все время в камеру, поддерживают в ней довольно значительное число ионов, так что наш измерительный прибор показывает приблизительно постоянный ток. Если частицы поступали бы в камеру редко, то прибор при достаточной чувствительности давал бы отдельные толчки тока, так как в промежутке между двумя налетами частиц газ в камере является изолятором и только после ионизации, произведенной частицей, в нем оказывается некоторое количество ионов, способное поддержать ток в течение очень короткого промежутка времени.

К сожалению, несмотря на то, что β -частицы на своем пути создают несколько тысяч, а α -частицы даже сотни тысяч ионов, все же заряд каждого иона настолько мал, что толчок тока в ионизационной камере даже от α -частицы не может быть непосредственно замечен никаким, даже самым чувствительным электроизмерительным прибором.¹

Однако здесь на помощь можно привлечь усиление толчков тока, которое может быть осуществлено двумя путями. Разберем сперва первый способ. Исторически он является более молодым (предложен в 1926 г.), но за последнее время получает

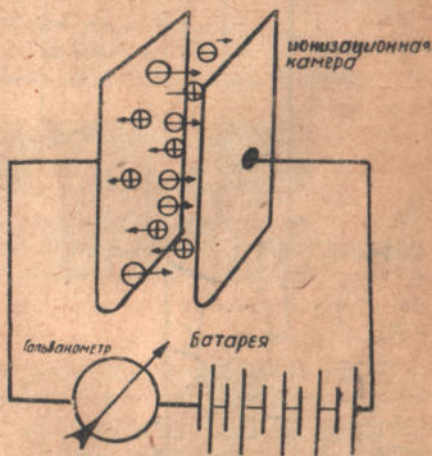


Рис. 18

¹ Четыре-пять лет тому назад Гофманом (Германия) был сконструирован электрометр, обладающий громадной чувствительностью. В принципе она достаточна для того, чтобы заметить толчок тока, вызванный попаданием в камеру одной α -частицы. Однако этот прибор настолько чувствителен к малейшим сотрясениям и вообще является настолько капризным, что работать с ним на такой чувствительности — истинное мучение. Кроме того, его подвижная система после каждого толчка довольно медленно возвращается в исходное положение, так что отдельные α -частицы могут быть замечены с его помощью только в том случае если они попадают в камеру не чаще двух раз в минуту.

все большее и большее распространение благодаря своим значительным преимуществам. Он основан на усилении с помощью катодных ламп, получившем широчайшее распространение в радиотехнике. В основном его идея заключается в следующем: изолированный электрод ионизационной камеры, который раньше мы присоединяли непосредственно к электроизмерительному прибору, присоединяется к сетке *C* усилительной лампы (рис. 19). Тогда даже небольшого заряда, переносимого ионами на сетку лампы, оказывается достаточно для значительного изменения

тока, текущего между катодом *K* и анодом *A* лампы. Пролет каждой частицы в камере будет сопровождаться довольно значительным толчком тока, текущего через лампу, которая таким образом будет играть ту же роль, что и в радиоприемнике, т. е. усиливать толчки тока. Все же, однако, толчки анодного тока первой лампы еще недостаточны для того, чтобы привести в действие приборы, удобные для счета частиц, поэтому в счетчиках с усилительными лампами применяют дальнейшие ступени усиления, используя толчки тока в первой лампе для зарядки сетки второй, — и т. д.

В зависимости от качества усилительных ламп и от того, какова чувствительность прибора, с помощью которого предполагается регистрировать частицы, различные исследователи

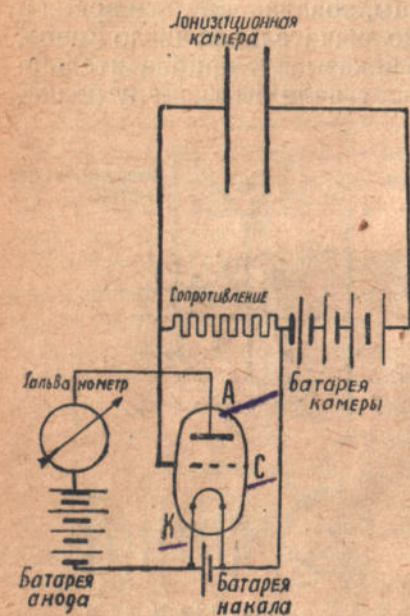


Рис. 19

применяют схемы, содержащие от четырех до восьми ламп, на детальном разборе которых мы, к сожалению, не имеем возможности остановиться. Пройдя соответствующее количество стадий последовательного усиления, толчки тока, отмечающие попадание в камеру отдельных частиц, увеличенные примерно в миллиард раз, подаются на регистрирующий прибор, тип которого выбирается до некоторой степени „по вкусу“ исследователя, отчасти же зависит и от характера исследования.

Действительно, если речь идет только о счете частиц, тогда важно знать только общее число толчков тока и неважна величина каждого толчка. В таких случаях счет ведется или на слух (телефон или громкоговоритель) или с помощью автоматического счетчика, который при каждом толчке или делает точку на бумажной ленте, или, что еще гораздо удобнее, на

специальном циферблате показывает число частиц, попавших в камеру за время, протекшее с момента запуска счетчика. С помощью такого рода автоматизации удается довести скорость счета до нескольких сот частиц в минуту. Конечно, „на слух“ считать с такой скоростью нельзя.

В некоторых случаях, однако, интересна, кроме того, и величина каждого толчка. При правильно работающей схеме эта величина в сильно увеличенном масштабе служит мерой заряда, перенесенного на сетку первой лампы, т. е. числа ионов, созданных частицей при пролете внутри камеры. По величине толчков тока можно различить, какая частица вызвала ионизацию в камере,¹ а следовательно, необходимо как-то регистрировать не только число, но и величину отдельных толчков.

Это достигается с помощью осциллографа — прибора, широко распространенного в электротехнике, который состоит из очень легкой системы двух проволочек (шлейф), помещенной между полюсами магнита и снабженной крошечным зеркальцем. При

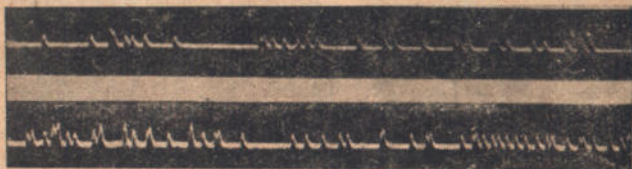


Рис. 20

пропускании через систему тока последняя поворачивается, а световой зайчик от зеркала, попадая на движущуюся светочувствительную ленту, „записывает“ отклонения осциллографа или, другими словами, толчки тока. Полученная „осциллограмма“ (рис. 20) позволяет судить не только о числе частиц, но и о количестве ионов, созданных каждой частицей, т. е. о ее сорте. Кроме того, осциллограф позволяет значительно увеличить скорость записи частиц, которая может быть доведена до 2000 в минуту.

Совершенно иным принципом усиления толчка, созданного отдельной частицей, воспользовался Счетчик Гейгера в своем остривом счетчике. Чтобы понять, как он действует, нужно сказать несколько слов о процессе разряда в газе. Как мы видели, при обычных условиях через газ, состоящий из нейтральных частиц, ток не проходит. Это верно только приближенно. На самом деле, в любом газе существует

¹ Т. е. α -частицы или H -частицы (протон); β -частицы в этом типе счетчиков благодаря малому количеству создаваемых ими ионов, не дают резких толчков тока. Разумеется, теоретически можно было бы прибегнуть к значительно большим усилениям, но практически пользоваться усилением большим, чем в миллиард раз, не стоит, так как при больших усилениях начинают резко сказываться всевозможные „помехи“.

некоторое, правда ничтожно малое (три-четыре штуки в кубическом сантиметре), число ионов.¹ Конечно, их настолько мало, что переносимый ими ток не удастся заметить даже самыми чувствительными приборами. Однако, увеличивая напряжение электрического поля в газе и ускоряя тем самым движение этих ионов, мы, наконец, сможем сообщить им такую живую силу, что они окажутся в состоянии при ударе об атом (или молекулу) газа расколоть их на ионы. Таким образом, как только достигнуто критическое значение для скорости первичных ионов, они начинают образовывать новые путем столкновения; эти новые, в свою очередь подхватываемые электрическим полем, разгоняются и сталкиваясь образуют опять новые и т. д. — ионный поток растет, как лавина, как снежный ком.

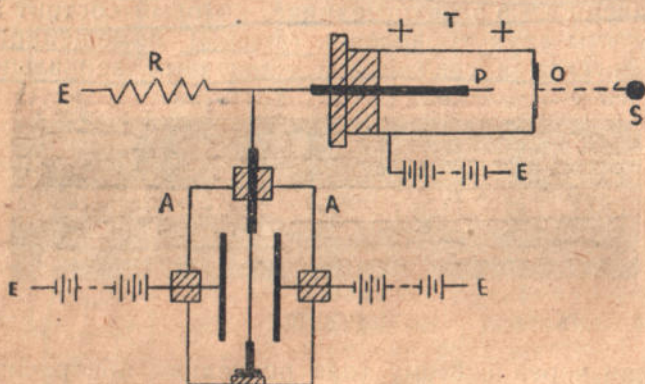


Рис. 21

Если в камере создать поле, достаточное для начала такой „ионизации толчком“ или „столкновением“, то при появлении в ней хотя бы одного иона мгновенно начнется разряд, при чем ток проходит в миллионы раз больший, чем могла бы непосредственно создать одна частица, даже если это α -частица, которая образует на своем пути свыше сотни тысяч ионов.

Для счетчика Гейгера совершенно безразлично, какая именно частица произвела первоначальную ионизацию, создала некоторое начальное количество ионов, так как любое исходное количество ионов в случае поля, достаточного для ионизации толчком, через несколько столкновений увеличивается в громадное число раз и приводит к разряду. Конструктивно камера в случае счетчика Гейгера имеет несколько другое оформление, чем камера, которую мы описали выше.

¹ Причиной появления этих ионов являются: 1) ничтожные количества радиоактивных веществ, содержащихся в земной коре, 2) ионизация ультрафиолетовыми лучами солнца и, наконец, 3) ионизация особым видом очень жестких лучей проникающее, космическое или (ультра- γ -излучение), доходящих к земле из мирового пространства.

Счетчик Гейгера (рис. 21) состоит из металлического кожуха, присоединенного к высоковольтной батарее, и иглы P , пропущенной внутрь счетчика сквозь крышку из очень хорошего изолятора. Игла отведена к земле через большое сопротивление R , которое настолько велико, что не успевает пропустить ток, идущий при разряде на иглу, благодаря чему потенциал иглы при разряде внезапно увеличивается, разряд прекращается, и игла медленно разряжается на землю. Скачки потенциала могут быть, как и в других счетчиках, усилены с помощью катодных ламп для записи на осциллографе, или без дальнейшего усиления приключаются к струнному электрометру A нить которого повторяет скачки потенциала, приближаясь к одному из „ножей“ электрометра в момент разряда и возвращаясь в исходное положение во время паузы между двумя отбросами. Исследуемые частицы пропускаются в камеру сквозь окошко O .



Рис. 22

Для внутреннего электрода выбрана форма иглы, так как при этой форме легче всего достигнуть значительного поля около самого электрода, чем обеспечивается большая чувствительность прибора и устойчивость его работы. Как мы говорили выше, для счетчика Гейгера число ионов, созданных одной вступившей в камеру частицей, играет второстепенную роль, и, следовательно, этот счетчик позволяет регистрировать не только α и H , но и β -частицы (см. рис. 22, на котором представлена запись α -, а затем β -частиц с помощью счетчика Гейгера и струнного электрометра).

Однако наряду со своими преимуществами счетчик Гейгера имеет и существенные недостатки. Во-первых, он не позволяет судить о природе частицы, вызвавшей отброс электрометра (толчок тока в разряде не зависит от первоначального числа ионов); во-вторых, требует чрезвычайно большого постоянства напряжения между кожухом и иглою ионизационной камеры, являясь в общем достаточно капризным прибором. Именно поэтому счетчик Гейгера неуклонно вытесняется более молодыми конкурентами — счетчиками с усилением на катодных лампах.

Мы ознакомились, таким образом, с основными техническими приемами, которые позволяют подойти к исследованию строения ядра на основе применения бомбардировки α -частицами ядер

нерадиоактивных элементов. Мы рассмотрели спинциллирующий экран, камеру Уильсона, ионизационную камеру и счетчики — приборы, в которые вложено чрезвычайно много изобретательности и труда, но которые зато позволяют „видеть“ и „слышать“ отблески и отзвуки тех явлений атомного мира, которые связаны с отдельными α - и β -частицами. Не случайно мы не касались до сих пор γ -лучей, исследование которых сводится, в конечном счете, к тем же приемам, но производится несколько более косвенно и менее наглядно.

Способы изучения γ -лучей γ -лучи, как мы знаем, в отличие от лучей α и β представляют собой не поток заряженных частиц, несущихся с большими скоростями, а электромагнитные колебания, подобные свету или рентгеновым лучам, только со значительно меньшей длиной волны. Огличительным свойством γ -лучей является их громадная проникающая способность, которая растет с уменьшением длины волны и притом так, что самые „жесткие“ γ -лучи ослабляются слоем свинца в 1 см всего лишь наполовину; при достаточно же мощном источнике излучения они могут быть обнаружены после прохождения через слой свинца толщиной в 15 см. В менее плотных веществах γ -лучи поглощаются еще значительно слабее, беспрепятственно проходя, например, в воздухе расстояния, измеряемые многими сотнями метров.

Такая малая поглощаемость γ -лучей указывает на то, что они в очень малой степени расходуют свою энергию, проходя сквозь газ, а следовательно, не могут на своем пути отщеплять электроны от большого числа атомов, образуя ионы так, как это делают лучи α или β . Действительно, ионизация, производимая γ -лучами в газе, настолько незначительна, что ею практически невозможно пользоваться для изучения этих лучей, в то время как все методы исследования лучей α и β основаны, в конечном итоге, именно на их ионизирующей способности.

γ -лучи, подобно лучам Рентгена, вызывают почернение фотографических пластинок, однако этот способ обнаружения γ -лучей редко применяется на практике в виду сравнительно малой чувствительности светочувствительного слоя пластинок к этому виду излучения, что, в свою очередь, связано с их малой поглощаемостью.

Вторичные электроны По счастью, γ -лучи все-таки возможно достаточно удобно обнаружить и исследовать.

Дело в том, что, попадая на нейтральный атом, γ -лучи в некоторых случаях расходуют часть своей энергии на вырывание из этого атома одного из электронов оболочки. В то время как ионизация лучами α и β идет за счет уменьшения живой силы этих миниатюрных снарядов в чудовишной разрушительной силы, так что после каждой новой ионизации уменьшается скорость пролетающей частицы, лучи γ , как и всякое другое электромагнитное колебание, распространяются со ско-

ростью света (300.000 км/сек), сохраняя эту скорость строго неизменной.

В чем же выражается уменьшение их энергии? Ведь мы знаем, что никакая работа не может быть выполнена без затраты соответствующего количества энергии, а, раз γ -лучи вырывают электроны из атомов, следовательно, они совершают работу против электрических сил, удерживающих электрон в составе атома.

Оказывается, что γ -лучи производят вырывание электронов за счет уменьшения своей частоты. Согласно теории квант, энергия излучения прямо пропорциональна его частоте (или обратно пропорциональна длине волны), так что, например, ультрафиолетовое излучение более „насыщено энергией“, чем видимый свет; в свою очередь рентгеновы лучи более богаты энергией, чем ультрафиолетовые, γ -лучи — более рентгеновых.

Таким образом, вырывание электрона из оболочки атома сопровождается уменьшением частоты γ -излучения, увеличением длины его волны. Это явление носит название явления или эффекта *Комптона*. „Вторичные“ или „комptonовские“ электроны, вырванные γ -лучами из оболочки нейтральных атомов, и предоставляют те последствия, по которым мы можем обнаружить, измерять и исследовать γ -лучи.

Не имея возможности „непосредственно“ обнаружить γ -лучи ни методом сцинтилляций, ни камерой Уильсона, ни счетчиками, мы можем их „проявить“, поставив на пути экран из тяжелого элемента (свинец, ртуть и т. д.) и обнаружив вторичные комptonовские электроны, вырванные ими из атомов тяжелого элемента. Изучая направления, скорости и число испущенных электронов, мы можем создать себе достаточно полное представление о вызвавшем их γ -излучении. Таким образом, вторичные электроны являются как бы „индикатором на γ лучи“ и, в конечном счете, позволяют пользоваться при обнаружении и измерении γ -лучей теми же методами, которые приняты для быстрых электронов (β -лучей), т. е. преимущественно ионизационной камерой и счетчиками.

Не станем долго останавливаться на дальнейших экспериментальных деталях исследования γ -лучей. Благодаря тому, что при этих исследованиях пользуются, так сказать, „третичными явлениями“ (γ -лучи вырывают комptonовские электроны, последние ионизуют газ в камере и только ионы этого газа дают измеримый нами ток), все измеряемые величины очень малы (ток в ионизационной камере, число толчков тока в счетчиках) и требуют для своего измерения большой чувствительности приборов, вообще высокой экспериментальной техники. В частности, не мало осложняет производство опытов необходимость защиты измерительных приборов от рассеянного γ излучения, которое может совершенно исказить результаты. Части установок для работы с γ -лучами защищаются толстыми свинцовыми экранами и перегородками толщиной иногда до 30 см.

Познакомившись с методами, позволяющими наблюдать действия отдельных частиц, испускаемых радиоактивными веществами, перейдем теперь к тем опытам, которые наряду с уже рассмотренными нами явлениями радиоактивного распада дали основной материал, на котором основаны наши представления о строении атомного ядра, т. е. к опытам по бомбардировке нейтральных атомов α -частицами.

α -частица, как снаряд для исследования ядра

Как мы знаем, ядро атома окружено оболочкой отрицательно заряженных электронов, которая защищает его от внешнего мира. Выбирая тип снаряда, который мы хотим забросить в ядро для исследования его свойств, мы должны остановиться на частице, которая возможно более беспрепятственно пронизывала бы электронную оболочку, проникая в центральные части атома. Испускаемые ядрами радиоактивных элементов α - и β -частицы обладают различной для различных элементов энергией; однако энергии α - и β -частиц во всяком случае довольно близки между собой (правда, большинство испускаемых ядрами β -частиц обладает энергией меньшей, чем у частицы α), так что на первый взгляд можно с одинаковой надеждой на успех бомбардировать ядра как α -, так и β -частицами.

Это, однако, совсем неверно: α -частицы, обладая массой, во много раз большей, значительно меньше отклоняются со своего пути при прохождении через внешнюю оболочку атомов, что можно видеть хотя бы из рис. 12 — 15, представляющих пути α - и β -частиц, снятые с помощью камеры Уильсона. Поэтому наш выбор должен остановиться на α -частице, которая и служила до последнего года единственным снарядом, которым пользовались для исследования ядер нерадиоактивных элементов.

Мы знаем, что не только силы, связывающие атомы в твердых телах, но и те силы, которые удерживают электронные оболочки атомов, — силы электрического происхождения, проявляющиеся как притяжение разноименных зарядов, исследованные еще полтора столетия тому назад французским физиком Кулоном, который, разумеется, и понятия не имел об электронах, ядрах и т. д. и производил свои опыты с легкими шариками на чувствительном приборе, называемом крутильными весами. Кулон установил, что сила притяжения двух разноименных зарядов или отталкивания двух одноименных возрастает с увеличением взаимодействующих зарядов (пропорционально их произведению) и убывает с увеличением расстояния между ними (обратно пропорционально квадрату расстояния). Свои опыты Кулон производил при расстоянии между центрами заряженных шариков, порядка сантиметров.

В дальнейшем все развитие представлений о периферической части атома (электронной оболочке), основанное на исследо-

ваниях электрических, химических, оптических и других свойств атомов, показало, что и взаимодействие отдельных атомов между собой и даже составных частей одного и того же атома подчиняется тому же закону Кулона, который таким образом оказался подтвержденным для взаимодействия зарядов, расположенных на расстояниях, измеряемых стомиллионными долями миллиметра.

Выяснение характера сил, действующих в самом сердце атома, его ядре, которое, как мы знаем, состоит в свою очередь из равноименно заряженных частиц, явилось задачей следующего этапа физики. Нельзя безоговорочно предположить, что и внутри ядра взаимодействие заряженных частиц подчиняется тому же закону Кулона, так как размеры ядра, как мы увидим в дальнейшем, еще в сотни тысяч раз меньше размеров атома. Для того чтобы выяснить характер взаимодействия составных частей ядра, установить внутреннюю структуру самой сокровенной части атома, нужно было прежде всего проверить справедливость закона Кулона в непосредственной близости атомного ядра. Для осуществления этого исследования можно воспользоваться быстрыми α -частицами, которые пролетают сквозь атом, подобно кометам через солнечную систему, почти достигая самого ядра.

Ясно, что при таком исследовании интересны только те редкие α -частицы, которые претерпевают значительное отклонение от своего пути при столкновении с атомом, так как это большое отклонение и указывает на то, что частица приблизилась к самому ядру (прохождение α -частицы через электронную оболочку, как мы знаем, не сопровождается сколько-нибудь заметным отклонением, благодаря тому, что масса электронов во много раз меньше чем у α -частиц).

Так как заряд α -частицы того же знака, что и заряд ядра, то взаимодействие между ними должно проявляться в виде взаимного отталкивания. Таким образом, наша аналогия с кометами оказывается неудачной: в то время как последние в сущности „падают к Солнцу“ и достигают максимальной скорости в непосредственной от него близости, α -частицы при движении к ядру тормозятся силами отталкивания, и это торможение тем резче, чем большим зарядом обладает ядро. Потому-то к ядрам могут подбираться только наиболее быстрые α -частицы и тем ближе, чем меньше заряд ядра, чем „легче“ атомы бомбардируемых элементов.

Разумеется, невозможно проследить во всех деталях путь α -частицы внутри атома; однако, если α -частица резко отклоняется от своего первоначального направления, то по величине этого отклонения можно судить о силах, которые на нее действовали во время полета вблизи ядра.

Способы изучения силового поля ядра с помощью α -частиц

Для исследования сил, действующих вблизи ядер различных элементов, или, как говорят, для изучения силового поля атомного ядра, пользуются следующим приемом: на миллиарды нейтральных атомов обрушивают ураганный огонь сотен тысяч α -частиц, из которых громадное большинство на своем пути не проходит в непосредственной близости от ядер и почти на всем протяжении своего полета движется прямолинейно, постепенно утрачивая свою энергию, расходуемую на отщепление электронов оболочек; однако некоторое число α -частиц резко изменяет свое направление, что указывает на их столкновение с ядрами. Изучение именно этих α -частиц и дает возможность судить о силовом поле ядер.

Пути α -частиц и „вилки“

Наиболее наглядное представление о столкновении α -частиц с ядрами можно получить с помощью камеры Уильсона. Именно таким путем и пошел Блэккетт, пуская пучок α -частиц от радиоактивного препарата в камеру, заполненную исследуемым газом. Таким образом им были исследованы водород, гелий, кислород и аргон. Из полученных Блэккеттом фотографии три (для водорода, гелия и кислорода) приведены на рис. 23, 24, 25.

Среди обычных прямолинейных с небольшими искривлениями в самом конце путей α -частиц мы видим на каждой из приведенных фотографий так называемые „вилки“. Такая вилка — результат „столкновения“ α -частицы с ядром. Пролетая вблизи ядра и испытывая отталкивание, α -частица в то же время отталкивает и ядро. Чем легче ядро, тем большую скорость приобретает оно под влиянием отталкивания α -частицы, тем больший путь сможет оно пролететь в газе. Это подтверждается рисунками, на которых пути „ядер отдачи“ убывают с возрастанием массы ядра. В частности, на рис. 24, так как ядро бомбардируемого гелия совершенно подобно α -частице, его след после столкновения совершенно подобен следу α -частицы, так что никак не разобрать, который из путей принадлежит падающей α -частице, а который α -частице, подвергнувшейся удару.

Несмотря на всю свою наглядность и изящество, изучение рассеяния α -частиц ядрами с помощью камеры Уильсона имеет ряд существеннейших недостатков. Не говоря уже о том, что этот метод пригоден только для газа, исследование с камерой Уильсона представляет необычайно трудоемкий процесс. Вероятность прохождения α -частицы возле самого ядра, следовательно и образования „вилки“, как мы видели, очень мала. Так как на каждой фотографии не должно быть очень значительного количества путей, иначе в них невозможно будет разобрать, приходится впускать в камеру весьма ограниченное число частиц (для чего в качестве источника применяют „слабые“, т. е. испускающие небольшое количество частиц препараты). В силу этого на громадном большинстве фотографий



Рис. 23



Рис. 24



Рис. 25

вилок не получается; многие сотни снимков производятся „впустую“, результаты многомесячных экспериментов выражаются всего в немногих удачных фотографиях.

Распределение
рассеянных
 α -частиц по
углам

Поэтому при исследовании силового поля ядра обычно пользуются менее трудоемким приемом, который заключается в следующем. Громадным числом α -частиц обстреливается тончайшая пластинка из исследуемого вещества, а число рассеянных под различными углами частиц определяется по методу счета сцинтилляций. Таким образом удается определить, какая часть из всего числа рассеянных α -частиц отклоняется на данный угол. Этот же метод применим и для исследования рассеяния α -частиц в различных газах.

Не имея возможности подробно останавливаться на экспериментальных деталях этих исследований, рекомендуем тем из читателей, которые захотят с ними познакомиться, книгу Резерфорда, в лаборатории которого соответствующие методы были разработаны и были проделаны ставшие классическими опыты по рассеянию α -частиц.¹ Теория отклонения α -частиц, разработанная Резерфордом и Дарвином на основе представлений о взаимодействии α -частиц с ядром, подчиняющимся закону Кулона, позволяет предсказать число частиц, претерпевших отклонение на различных углах. Совпадение найденных опытным путем чисел с вычисленными показало бы, что предпосылки теории верны, т. е. что взаимодействие α -частицы с ядром на всем протяжении ее пути внутри атома действительно определяется кулоновскими силами.

Если бы, напротив, число α -частиц, отклоненных на определенный угол, оказалось меньшим или большим, чем вычисленное на основании теории, это значило бы, что частицы на своем пути внутри ядра испытывают силы меньшие или большие, чем следовало бы по закону Кулона. В таком статистическом исследовании числа частиц, рассеянных под различным углом, мы имеем средство „прощупать“ силовое поле вокруг ядра. Мы имеем как бы „зонд“, которым ощущаем тем более глубокие недра атома, чем больше угол, под которым мы наблюдаем рассеянные α -частицы.

Один из талантливейших сотрудников Резерфорда Чадвик проделал ряд опытов со счетом α -частиц, рассеянных под разными углами. Им были „обстреляны“ быстрыми α -частицами тончайшие фольги из меди, серебра и платины. Подсчет частиц, рассеянных под различными углами, дал полное подтверждение теории. Помимо этого, опыты Чадвика позволили непосредственно определить заряд ядер

¹ Резерфорд — „Строение атома и искусственное разложение элементов“. Гиз (Современные проблемы естествознания) 1923 г.

исследованных элементов, при чем его результаты оказались в полнейшем согласии с определениями, полученными другими методами, что было грандиозным торжеством опытов по обстрелу атомов α -частицами. Минимальное расстояние, на которое при этих опытах α -частицы подбирались к платиновому ядру, измеряется всего семью миллиардными сантиметра (7×10^{-12} см).

Из своих опытов Чадвик заключил, что на этих расстояниях кулоновский закон взаимодействия заряженных тел еще остается в силе.

Рассеяние α -частиц ядрами легких элементов

Чтобы прозондировать силовое поле в областях, еще более близких к ядру атома, следовало обратиться к более легким элементам, ядро которых, обладающее меньшим зарядом, способно „подпустить“ к себе α -частицу на еще меньшее расстояние. Эти опыты были проделаны другим сотрудником Резерфорда — Билером. К сожалению, „поголовное“ исследование легких элементов весьма затруднительно в силу их неблагоприятных химических свойств, и Билеру пришлось ограничиться исследованием магния и алюминия с зарядами ядер, равными соответственно $+12$ и $+13$ элементарным. При своих опытах Билеру удалось заметить частицы, отклоненные на углы значительно большие, чем в опытах Чадвика (вплоть до 90°), что указывает на более глубокое проникновение частиц в „приядерную область“. При этих опытах вскрылись противоречия между теорией Дарвина — Резерфорда, рассматривавших α -частицы и ядра как точечные одноименные заряды, взаимодействующие по закону Кулона. Число наблюдаемых α -частиц, рассеянных под большими углами, значительно меньше, чем следовало по теории.

В чем здесь дело? Действуют ли на столь малых расстояниях какие-то новые силы, с проявлениями которых не приходится сталкиваться при исследовании обычных неизмеримо более крупных объектов? Заменяется ли взаимное отталкивание одноименных зарядов, наблюдаемых на больших расстояниях, силами притяжения? На эти вопросы опыты Билера ответа еще не дают. Однако на основании довольно наглядных предположений можно дать одно из возможных объяснений наблюдаемых отступлений от закона Кулона.

Толкование результатов исследования рассеяния α -частиц легкими ядрами

Ведь, в сущности говоря, закон Кулона справедлив только для точечных зарядов, иначе говоря, для таких заряженных тел, размеры которых значительно меньше, чем расстояние между ними. Это условие вряд ли выполняется при тех расстояниях, на которые α -частицы приближались к легким ядрам в опытах Билера. Ведь как α -частицы, так и обстреливаемые ядра представляют собой сложные образования из положительных и отрицательных частиц, и только на довольно больших расстояниях их можно рассматривать как од-

нородные частицы с зарядом, равным сумме зарядов их составных частей (протонов и электронов). Вникая более глубоко в процесс „столкновения“ α -частицы с ядром, мы не должны забывать о том, что α -частица отталкивается только протонами ядра, но в то же время притягивается внутриядерными электронами. Поэтому можно ожидать, что при приближении α -частицы к ядру его электроны будут смещаться навстречу частице, а протоны — отталкиваться в „дальнюю часть“ ядра. При этом расстояние от α -частицы до положительного заряда ядра (протонов) увеличится, а до внутриядерных электронов — уменьшится, и, следовательно, силы отталкивания будут расти с уменьшением расстояния медленнее, чем по закону Кулона, а силы притяжения от внутриядерных электронов — быстрее, чем можно было бы ожидать для точечного ядра.

Таким образом, электрическое поле приближающейся α -частицы может вызвать расталкивание противоположно заряженных частей ядра в разные стороны, т. е. смещение зарядов, которое в электростатике носит название поляризации. Проведенный на основе этих представлений упрощенный подсчет дает результаты, очень близкие к тем, которые в своих опытах получил Билер, а именно, что на α -частицу, подлетающую совсем близко к ядру, кроме кулоновской силы отталкивания (обратно пропорциональной квадрату расстояния), действует еще и сила притяжения, очень быстро возрастающая с приближением к ядру (обратно пропорционально пятой степени расстояния), которая, начиная с определенного расстояния, (по Билеру для ядра алюминия оно равно трем десятибиллионным сантиметра — 3×10^{-13}), даже превосходит силу отталкивания.

Таким образом, можно сказать, что представление о поляризуемости ядер дает удовлетворительное объяснение кажущимся отступлениям от законов Кулона. Кроме того, в опытах по рассеянию α -частиц легкими ядрами мы встречаем подтверждение нашей теории о существовании в ядре разноименно заряженных частиц; наконец, все известные до сего времени факты говорят в пользу справедливости электростатического закона Кулона даже и для таких ничтожных расстояний, как в ядре.

Эта область (рассеяние α -частиц) представляет одну из наиболее разработанных и вместе с тем наиболее интересных отраслей исследования ядра. Помимо того интереса, какой представляет само по себе исследование природы тех сил взаимодействия, которые связывают между собой составные части ядер, опыты по рассеянию α -частиц дают возможность оценить размеры атомных ядер.

Число α -частиц, отброшенных при столкновении с ядрами золота под углом большим 90° , составляет не более одной десятитысячной от всех падающих α -частиц. Если мы учтем, что каждая из частиц

Размеры атомных ядер

прежде чем потерять свою скорость, пронизывает также около десятка тысяч атомов, то мы приходим к заключению, что α -частица попадает в ядро только в одном из ста миллионов столкновений с атомами. Представим себе ядро атома как центральное черное яблоко в белой мишени, площадь которой соответствует размерам всего атома. Из этого наглядного примера мы видим, что радиус ядра относится к радиусу атома, как один к корню квадратному из ста миллионов, т. е. 1 к 10 000.

Таким образом, поперечник ядра примерно в 10 000 раз меньше диаметра атома. Так как радиус атома золота измеряется примерно одной стомиллионной сантиметра, то радиус ядра не превышает одной биллионной сантиметра (т. е. выражается десятичной дробью, у которой после запятой идет одиннадцать нулей).

Необходимо заметить, что такие рассуждения дают величину ядра только очень приблизительно. Различные исследователи, занимавшиеся рассеянием α -частиц, предлагают несколько различные цифры. Размеры ядер для радиоактивных элементов могут быть оценены и на основании совсем иных соображений, на которых мы здесь не имеем возможности остановиться. Наконец, опыты по искусственному разрушению ядер, в свою очередь, позволяют произвести оценку размеров ядер и опять-таки дают несколько иные значения. Таким образом, вопрос о размере атомных ядер нельзя считать окончательно решенным, однако те пределы, в которых лежат эти размеры, или, как говорят физики, их „порядок величины“ можно оценить с достаточной достоверностью. „Порядок“ поперечников ядер — несколько биллионных сантиметра, ядра занимают ничтожную часть объема атома. Более точное определение внутриатомных размеров — дело дальнейших исследований.

Разрушение ядер Раскроем теперь самую славную страницу исследования атомного ядра, на которой мы опять-таки встретим имя знаменитого Резерфорда, которому впервые удалось опровергнуть представление о невозможности превращений нерадиоактивных элементов, посчастливилось разрушить атомное ядро и тем самым широко раздвинуть рамки наших представлений о внутреннем строении вещества. Во всех опытах по разрушению ядер особую роль играют H-частицы — быстрые протоны. Для того чтобы понять тот путь, которым Резерфорд пришел к своим классическим опытам, необходимо коротко остановиться на некоторых свойствах этих H-частиц, которые могут быть изучены и не только при разрушении ядер.

H-частицы Опытный игрок на бильярде, точно ударив кием белый шар в центр, может добиться совершенно центрального удара этого шара в центр другого, скажем красного. При этом после столкновения белый шар остановится, „как вкопанный“, а красный покатится с той скоростью, которой

обладал белый до столкновения. Это явление происходит, однако, лишь при одном специальном условии, которое как раз на биллиарде выполнено: именно если шары обладают одинаковым весом, вернее, одинаковой массой. Если бы красный шар имел значительно большую массу, чем белый, он вовсе бы не пришел в движение, а белый отскочил бы от него, как от стенки. Если бы, напротив, тяжелее был белый шар, то красный после удара получил бы значительно большую скорость, а белый продолжал бы двигаться, хотя и медленнее, чем до столкновения.

Уменьшив размеры наших биллиардных шаров приблизительно в биллион раз, мы приходим к размерам атомных ядер. Представим себе теперь, что белый шар это α -частица (ядро гелия), а красный — ядро какого-нибудь иного атома, которое подвергается центральному удару α -частицы.

Мы уже видели, что, в сущности говоря, ни ядро ни α -частица не представляют собой в действительности упругих шариков. Их состав, строение, а следовательно и силы взаимодействия между ними в момент удара будут резко отличаться от того, что имеет место при ударе упругих шариков, однако для того, чтобы составить себе представление о характере ядерных столкновений, и даже для количественного описания этих столкновений, аналогия с биллиардными шарами окажется очень полезной.

Масса большинства атомных ядер, как мы знаем, значительно больше, чем у α -частицы и при столкновении с таким ядром α -частица должна отскочить, при чем „подстреленное ядро“ после столкновения будет получать тем меньшую скорость, чем больше его масса. Это весьма наглядно подтверждается фотографиями, снятыми с помощью камеры Уильсона с „нецентральных“ ударов α -частиц о ядра гелия и кислорода (рис. 24 и 25). Если, однако, представить себе, что α -частица ударяется о ядро водорода, в четыре раза более легкое, чем она сама, то можно ожидать, что после удара частицы будут вести себя, как шары во втором примере из биллиардной игры, т. е. что легкое ядро водорода приобретет скорость значительно (по расчету на 60%) большую, чем первоначальная скорость α -частицы. Такое водородное ядро еще в большей степени, чем α -частица, будет обладать способностью беспрепятственно пронизывать атомы вещества, пролетая значительно более длинные прямолинейные пути, чем сама α -частица (рис. 23).

Таким образом, вследствие ядерного столкновения α -частицы с атомом водорода возникает быстро несущееся водородное ядро с большим пробегом, так называемый H -луч или H -частица.

Один из сотрудников Резерфорда — Дарвин, разработавший совместно с ним теорию рассеяния α -частиц, подсчитал, что такие частицы будут обладать в воздухе пробегами в четыре

раза большими, чем α -частицы, столкновению с которыми они обязаны своею скоростью.

Другому сотруднику Резерфорда—Марсдену удалось получить эти H -частицы. При бомбардировке сжатого водорода, а позднее твердых химических соединений, содержащих большие количества водорода (например, парафин), миллионами α -частиц от сильного радиоактивного препарата¹ Марсдену удалось наблюдать единичные H -частицы. Они оказались настолько проникающими, что их присутствие могло быть установлено с помощью сцинтилляций после прохождения пластинки из слюды, соответствующей воздушному промежутку около 30 см. Пробег выбивающих эти протоны α -частиц был немного больше 7 см., так что отношение пробегов, в полном согласии с предсказанием Дарвина, оказалось равным 4:1.

Подобно α -частицам H -частицы при столкновении с экраном из сернистого цинка также дают вспышки, но эти сцинтилляции, впервые наблюденные Марсденом, значительно слабее сцинтилляций, вызванных α -частицами, вследствие чего их гораздо труднее наблюдать. Ионизирующая способность и фотографическое действие этих „водородных лучей“ также значительно слабее, чем у α -частиц. Кроме того, опыты с H -частицами осложняются тем, что они испускаются в чрезвычайно малых количествах.

Марсден установил, что при прохождении ста тысяч α -частиц через сантиметровый слой водорода при атмосферном давлении выбивается всего одна H -частица. В такой малой „меткости“ бомбардировки водородных ядер α -частицами нет впрочем ничего удивительного, стоит только вспомнить ничтожные размеры как снаряда, так и мишени.

Однако, несмотря на малый выход H -частиц при бомбардировке водорода и его соединений α -частицами, „естественные H -частицы“, т. е. ядра водорода, которым сообщена огромная скорость ударом α -частицы, были наблюдаемы различными способами. На одной из знаменитых фотографий Блэкетта (рис. 23) можно видеть след α -частицы до и после столкновения с ядром, а также след выбитой H -частицы. С помощью камеры Уильсона фотографии путей H -частиц, выбитых из парафина, делались неоднократно; а пользуясь способностью H -частиц вызывать сцинтилляции, можно построить очень несложный приборчик, позволяющий видеть вспышки, вызванные H -частицами.

Этот прибор назван H -спинтарископом по аналогии с обычным спинтарископом, позволяющим наблюдать сцинтилляции непосредственно от α -частиц. Применяемый в этом приборе источник H -частиц

¹ Для всех явлений, происходящих с ядрами, несущественно — свободны ли соответствующие атомы или связаны в химические соединения.

изготавливается следующим образом. На небольшой серебряной или никелевой пластинке осаждается сильно радиоактивное вещество — полоний, испускающее исключительно α -лучи с пробегом в воздухе около 4 см. С помощью микротома (перемещающаяся на салазках бритва, применяемая биологами для изготовления тончайших срезов тканей для микроскопического исследования) вырезается лепесток парафина толщиной в несколько сотых миллиметра, укрепляемый на тонком листке слюды. Толщина последнего подбирается таким образом, чтобы в ней были задержаны все α -частицы, выходящие из полония.

Если такой двойной слой положить вниз парафином на препарат полония, то большинство испускаемых им α -частиц со всей своей энергией бомбардируют парафин, но не могут вылететь наружу, застревая в слое слюды. Вместе с тем выбитые из парафина водородные ядра обладают настолько большой

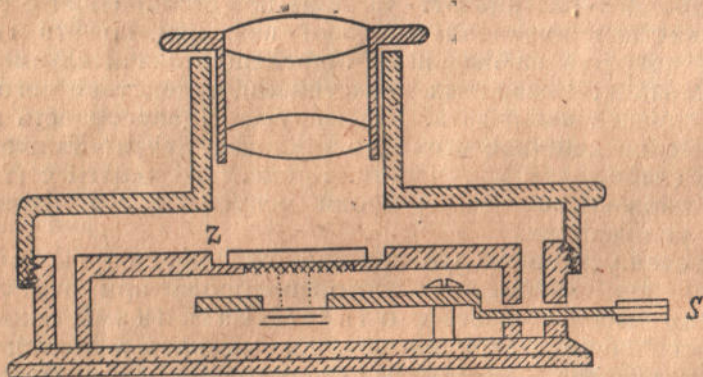


Рис. 26

проникающей способностью, что они легко пронизывают парафин и слюду и даже вызывают сцинтилляции на поставленном на другую сторону слюды экране.

На рис. 26 представлен в разрезе H -спинтарископ, который позволяет не только наблюдать сцинтилляции от H -частиц, но и сравнить их со сцинтилляциями α -частиц от слабого препарата полония. Оба источника (изготовленный, как было описано, источник H -частиц и открытый слабый препарат полония) помещены на подвижном держателе, который с помощью штифтика s может быть установлен так, чтобы на экран z попадало излучение от любого из этих источников.

Если дать глазам отдохнуть в течение 10—15 минут в абсолютно темном помещении, то затем через микроскоп в верхней части прибора можно наблюдать мельчайшие, подобные булавочному уколу, вспышки, вызванные H -частицами, и значительно более яркие „ α -вспышки“ и, таким образом, стать свидетелем „биллиардной игры“ атомных ядер.

Однако, несмотря на то, что имеется ряд методов, допускающих наблюдение H -частиц, вплоть до чрезвычайно несложных в роде H -спинтарископа, все же нельзя забывать, что образование H -частицы — явление чрезвычайно редкое. Даже используя почти полностью всю энергию испускаемых α -частиц, поглощая их в слое парафина, не приходится рассчитывать на выход большой, чем сто H -частиц на миллион падающих α -снарядов“.

Вместе с тем H -частицы сами по себе достаточно интересны; они представляют собой протоны, т. е. наряду с электронами являются теми мельчайшими основными элементами, из которых построены все ядра, и, наконец, обладают громадной кинетической энергией, так что невольно напрашивается идея использовать именно их для опытов по обстрелу ядер; однако до последнего времени такие опыты не могли быть поставлены, в виду отсутствия достаточно мощных источников естественных H -частиц.

Идея искусственного расщепления атомов или превращения элементов зародилась еще в средние века. Во времена алхимиков поиски „философского камня“, с помощью которого можно превращать один элемент в другой, проводились при непосредственной поддержке феодальных владык, рассчитывавших таким образом поправить финансовое благосостояние своих государств и в первую очередь зачинить прорехи в собственных карманах.

Несмотря, однако, на эту поддержку, в исторических документах почти не встречается указаний на успешные результаты превращения „неблагородных металлов“ в золото. Единичные „удачные“ опыты не поддавались повторению, ибо или во время исчезал удачливый алхимик, или иссякали источники его „философского камня“. Естественно, что постоянные неудачи приводили в ярость „высоких покровителей“, и не мало алхимиков, не оправдавших надежд феодальных владык, покончили свою жизнь на виселице, плахе и костре. Однако даже и в тех случаях, когда интерес правителей к алхимическим опытам иссякал, верные своему делу алхимики продолжали свои „исследования“, окрыляемые не только и не всегда стремлением к наживе, а и философскими соображениями, согласно которым еще со времен Аристотеля предполагалось, что все существующее многообразие форм вещества состоит из одной и той же „первичной материи“, а следовательно, эти формы при соответствующих условиях могут перейти из одной в другую.

Нельзя, конечно, сказать, что все данные, полученные алхимиками, пропали даром; кое-чем смогла воспользоваться химия, которая, выкристаллизовавшись после Лавуазье в самостоятельную точную науку, заменила в большинстве шарлатанскую и непоследовательную алхимию; однако с полной достоверностью можно утверждать, что поиски „философского камня“ средневековыми алхимиками в вопросе о превращениях элементов

положительных результатов не дали, да и не могли дать, так как слишком уж бедны были те отрывистые сведения о строении вещества, которыми располагали исследователи того времени.

По мере развития химии представление об устойчивости и „непревратимости“ элементов начинает становиться все более и более распространенным, так что даже знаменитый Менделеев был убежденнейшим сторонником независимости отдельных химических элементов и считал нелепой идею „первичной материи“. Оружие, имевшееся в руках химиков, было ничтожно перед громадными силами, связывающими между собой части атомных ядер, и долго еще превращение элементов представлялось „быть может осуществимым теоретически, но невысказанным на практике“.

Открытие самопроизвольного (радиоактивного) распада некоторых новых элементов, естественно, пробудило интерес к старой, заброшенной проблеме превращения элементов. Возник ряд исследований, посвященных превращению обычных, нерадиоактивных элементов. Хотя имеющиеся в арсенале физика и химика меры воздействия не оказывали ни малейшего влияния на ход радиоактивных превращений, самые эти процессы в виде радиоактивных излучений дали в руки физиков могущественное оружие для атаки ядра, так как вскоре после открытия радиоактивности уже стало известно, что радиоактивные излучения способны затрагивать глубокие недра атомов и вызывать столь значительные потрясения в их структуре, каких не удавалось вызвать никакими другими воздействиями. Казалось возможным, что при некоторых особенно удачных столкновениях частиц, выброшенных при радиоактивном распаде, с ядрами атомов можно ожидать разрушения последних. В то же время из опытов по рассеянию α -частиц было известно, что такие столкновения должны быть необычайно редкими. Естественно, что в качестве снаряда, предназначенного для разрушения ядра, были выбраны α -частицы в силу своей огромной энергии и количества движения, которые соответствуют скорости атомов гелия при температуре в шестьдесят миллиардов градусов (6×10^{10}).

Начиная с 1907 г. разные исследователи бились над проблемой расщепления ядер ударами α -частиц. Нередко им казалось, что результат достигнут, т. е. что под действием энергичной бомбардировки α -частицами в исходном материале появлялись некоторые примеси посторонних элементов, однако эти утверждения не выдерживали серьезного анализа, так как всегда оказывалось, что появление новых примесей объяснялось какими-либо „более прозаическими“ причинами (загрязнение исходного материала, сосуда и т. п.).

Только в 1919 г. Резерфорду впервые удалось установить разрушение ядер. Это событие по своему значению стоит на-ряду с открытиями Беккереля (радиоактивность) и Рентгена, так как открыло

Открытие
Резерфорда

совершенно новый путь исследования строения материи. Как и два других великих открытия, окрыливших физику двадцатого века, открытие Резерфорда было им сделано случайно.

После того, как Марсдену удалось ударом быстрых α -частиц о ядра водорода придать последним громадную скорость (H -частицы), Резерфорд решил попробовать получить аналогичным образом ускоренные ядра других легких элементов. Метод эксперимента был в высшей степени простым и вместе с тем чувствительным; конструкция прибора ясна из рис. 27. Источником α -лучей служил сильный препарат радия C , нанесенный на поверхности диска D , укрепленного на направляющей $B-B$, и заключенный в прямоугольную коробку $A-A$, которая была достаточно хорошо уплотнена и могла быть откачана и запол-

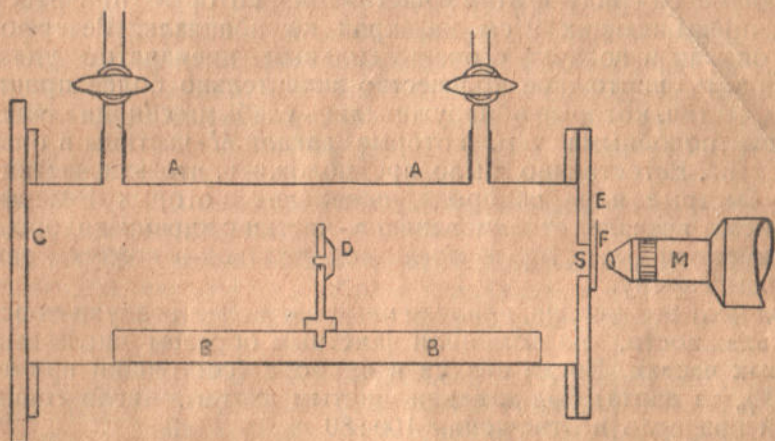


Рис. 27

нена любым газом. В дне E коробки было проделано отверстие, закрытое тонкой серебряной фольгой, за которой, на расстоянии около 2 мм, был укреплен экран из сернистого цинка F . Весь прибор помещался в сильное магнитное поле, загибавшее выбрасываемые препаратом β -частицы, которые в противном случае попадали на экран и вызывали его свечение, что делало невозможным наблюдение сцинтилляций.

Пока расстояние между диском D и экраном F (включая толщину фольги, которая соответствовала воздушному промежутку в несколько сантиметров) не превышало пробега α -частиц, испускаемых препаратом, на экране вспыхивало бесчисленное множество сцинтилляций, вызванных α -частицами, выброшенными препаратом, но не они интересовали Резерфорда. Он искал сцинтилляции при пробеге частиц, превышающем 7 см, — результат удара „вторичных частиц“ — ядер газа, заполняющего сосуд, приведенных в движение ударом α -частиц.

Резерфорд исследовал азот, кислород, воздух и углекислоту и сразу же установил наличие немногочисленных сцинтилляций при расстоянии от препарата до экрана в 9 см воздушного пробега. Вначале он предположил, что причина этих сцинтилляций лежит в ударах атомов кислорода и азота, получивших большие скорости от удара α -частиц; однако вскоре он сам отверг это объяснение, так как ему удалось показать, что радий С, на-ряду с громадным количеством α -частиц с пробегом в 7 см испускает небольшое количество так называемых дальнوبرежных α -частиц, о которых нам уже приходилось говорить в связи с γ -лучами. Пробег этих частиц равен в воздухе 9 см, так что сцинтилляции, о которых мы только что говорили, несомненно объяснялись длиннوبرежными α -частицами.

Однако на-ряду с этими частицами, которые при расстояниях, превышающих 9 см, на экран не попадали, Резерфорду при опытах в воздухе с очень сильным препаратом удалось установить ничтожное количество значительно более проникающих частиц, которые обнаруживались слабыми сцинтилляциями экрана, подобными тем, которые давали H -частицы в опытах Марсдена. Естественно было предположить, что эти частицы и есть быстрые ядра водорода, появление которых Резерфорд приписал вначале столкновению α -частиц с ядрами водорода в молекулах воды, которые могли содержаться в воздухе, заполнявшем камеру.

Однако все усилия, приложенные к очистке воздуха от остатков влажности, не изменили заметным образом числа выброшенных частиц. Когда воздух в приборе (состоящий примерно на 80% из азота) был заменен чистым азотом, число сцинтилляций возросло в отношении 100:80.

После этого Резерфорду стало ясно, что соответствующие частицы несомненно происходят из азота, и в 1919 г. им было выдвинуто смелое утверждение о том, что они представляют собой осколки ядер, водородные ядра — протоны, выбитые из ядер азота быстрыми α -частицами.

Таким образом, те слабые сцинтилляции, которые Резерфорд считал на экране из сернистого цинка, расположенном вне пределов досягаемости для α -частиц, испускаемых препаратом, — по его мнению представляли первое указание на превращение элементов, вызванное громадной энергией налетевшей α -частицы, но происходящее исключительно редко: в случае совершенно центрального удара α -частицы в ядро.

В кислороде и углекислоте таких частичек наблюсти не удалось, так что вначале азот был единственным элементом, ядро которого оказалось возможным „взорвать“.

Прежде чем перейти к дальнейшим обобщениям и выводам из этого важного открытия, необходимо было убедиться в том, что длиннوبرежные частицы, вызывающие сцинтилляции экрана в опытах Резерфорда, действительно H -частицы, т. е. быстрые

протоны. Для окончательного суждения об их природе было недостаточно того, что они обладают пробегом не меньшим, чем у естественных H -частиц, и вызывают подобно им слабые сцинтилляции экрана. Поэтому были произведены опыты по отклонению этих частиц в магнитном поле, которые показали, что они действительно отклоняются и притом в надлежащую сторону и на такую величину, которая соответствует протону, несущемуся со скоростью, соответствующей его пробегу.

Эти опыты окончательно установили природу частиц, появление которых Резерфорд приписал искусственному расщеплению ядер.

Открытие Резерфорда, — пожалуй, самое значительное во всей его блестящей научной деятельности — вызвало необычайный интерес в научном мире. Несмотря на исключительный авторитет Резерфорда, вначале казалось слишком мало вероятным, что немногие слабые сцинтилляции, наблюдаемые на экране при наличии в миллион раз более сильной бомбардировки α -частицами, представляют собой осуществление мечты многих столетий, подтверждение гипотезы Проута и начало объединения физики и химии в новую отрасль науки, ставящей себе конечной целью исследование строения атомного ядра и искусственное его расщепление.

Однако дальнейшие опыты, проведенные Резерфордом совместно с одним из его наиболее талантливых учеников Чадвиком, полностью подтвердили его первоначальное смелое предположение.

Основным возражением против первых опытов Резерфорда оставалась ссылка на возможность образования „естественных“ H -частиц, ускоренных ядер водорода, под влиянием столкновения α -частиц с ничтожным количеством водорода, который мог в чистом виде или как соединение быть подмешан к исследуемым газам.

Однако опыты Резерфорда и Чадвика окончательно устранили это основное затруднение. Ими было показано, что H -частицы, получающиеся при бомбардировке азота, обладают значительно большим пробегом, чем „естественные“ H -частицы, полученные в водороде. Например, бомбардировка водорода α -лучами радия C с пробегом 7 см дает частицы, поглощающиеся слоем воздуха толщиной в 29 см, те же самые α -частицы, проходя в азоте, выбивают H -частицы с пробегом в 40 см. Эти опыты окончательно решили в положительном смысле вопрос, об осуществлении искусственного разрушения ядер, показав, что образование H -частиц в азоте не может быть приписано наличию примеси водорода.

Они дали также возможность подойти к искусственному разрушению ядер других элементов, ибо, располагая экран на расстоянии, превышающем по своей поглощающей способности

32 см воздуха, можно было иметь полную уверенность в том, что „естественные H -частицы“ до него не долетят, а следовательно, наличие сцинтилляций будет означать, что происходит расщепление ядер исследуемого элемента.

Дезинтеграция других элементов
Таким путем было с несомненностью показано, что α -частицы вызывают расщепление или, как говорят, дезинтеграцию шести элементов, а именно: бора, азота, фтора, натрия, алюминия и фосфора. Разумеется, был подвергнут исследованию и ряд других элементов, но в этих опытах выбивания длиннопробежных протонов не наблюдалось. Конечно, можно было предположить, что протоны выбиваются и из ядер других элементов, но только обладают пробегами меньшими, чем 32 см воздуха. Поиски этих протонов, однако не дали вначале интересных результатов. Правда, было установлено, что протоны с небольшими пробегами наблюдаются почти всегда, однако, можно было думать, что они частью испускаются источником α -частиц, а частью объясняются примесью водорода или его соединений к исследуемым веществам.

Метод наблюдения под углом к направлению α -частиц
Однако при проведении этих опытов было установлено, что при дезинтеграции протоны выбрасываются по всевозможным направлениям, в то время как естественные H -частицы (ядро водорода, ускоренное ударом α -частицы) вылетают только в направлении движения этих α -частиц. Поэтому, наблюдая сцинтилляции под углом, скажем, в 90° к направлению движения α -частиц, можно было с уверенностью сказать, что каждая вспышка — результат разрушения ядра, так как естественные H -частицы не могут попасть на экран.

Исходя из этого, Резерфорд и Чадвик вели дальнейшие свои исследования с другим прибором, схема которого изображена на рис. 28.

Пучок α -лучей от источника S падал на исследуемое вещество, помещенное на пластинке F , а сцинтилляции, вызванные выбитыми из него частицами, наблюдались на экране из сернистого цинка O , расположенного под углом в 90° (или более) к направлению падающих α -частиц. Как источник, так и исследуемое вещество были заключены в латунную коробку, из которой во время опыта выкачивался воздух. Экран находился снаружи этой коробки, против окошка, закрытого слюдяной пластинкой, толщина которой соответствовала слою воздуха в 7 см.

В этих условиях всякая сцинтилляция указывала на разрушение ядра. Естественные H -частицы на экран не попадали, что было проверено напусканьем в сосуд водорода, в результате которого число сцинтилляций несколько не увеличивалось.

С помощью этого прибора Резерфорду и Чадвику удалось доказать разрушение ядер еще семи элементов: неона, магния, кремния, серы, хлора, аргона и калия. Не удалось установить

дезинтеграции гелия, лития, бериллия, кислорода и углерода, а также элементов с атомным весом большим, чем у калия. Таким образом, в результате опытов Резерфорда оказались разрушенными ядра всех легких элементов, кончая калием, за исключением водорода, гелия, лития, бериллия, углерода и кислорода. Для всех этих элементов разрушение ядер сопровождается выбрасыванием чрезвычайно быстрых протонов

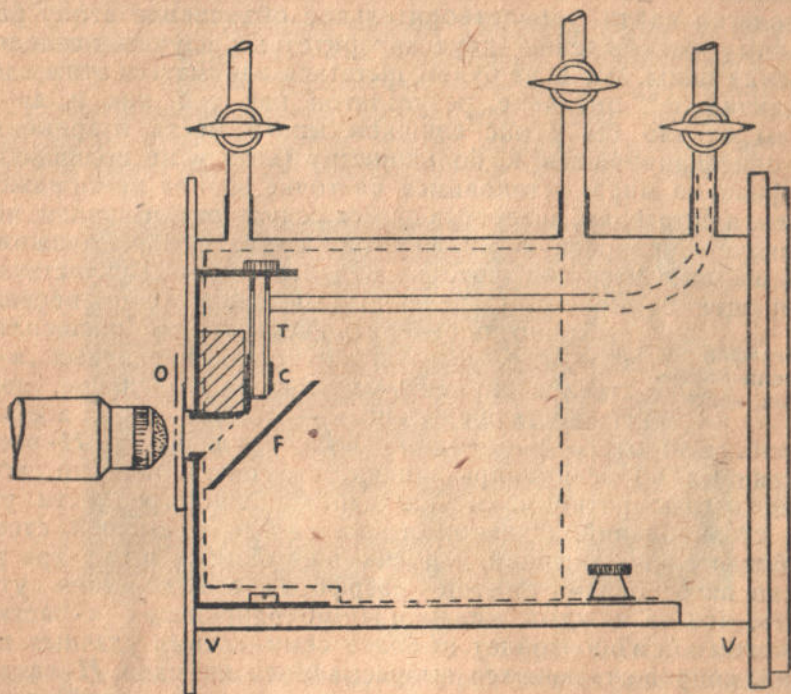


Рис. 28

и притом (во всяком случае, для большинства элементов) — во всевозможных направлениях.

Вскоре после первых опытов Резерфорда по разрушению ядер азота и одновременно с началом опытов Резерфорда и Чадвика, проблемой разрушения атомного ядра занялись двое венских ученых — Петерсен и Кирш, возглавившие в дальнейшем целую венскую школу исследования атомного ядра. Эта школа провела и проводит большое количество экспериментов по искусственному разложению ядер и связанным с этим вопросом задачам. Результаты этих исследований в большинстве случаев стоят в очевидном противоречии с данными Резерфорда и Чадвика. Коротко говоря, основным пунктом противоречия является то, что по опытам венцев расщепление ядра происходит

значительно легче и чаще, чем это следует из результатов кембриджской школы. Кириш и Петерсен находят, что ядра почти всех элементов могут быть расщеплены ударом α -частиц, и вероятность этого расщепления даже для тех элементов, разрушение которых признают доказанным Резерфорд и Чадвик, по данным венцев значительно большая, чем по данным кембрижцев.

Нелегко найти удовлетворительное объяснение этому радикальному расхождению двух авторитетных научно-исследовательских школ. Мы и не будем пытаться заниматься этим здесь; „объективное“ описание результатов как той, так и другой школы отняло бы у нас слишком много места и времени, и мы, присоединившись к большинству (хотя и не подавляющему) физиков мира, остановимся на точке зрения кембриджской школы, а читателям, интересующимся результатами венцев, порекомендуем прекрасную книжку одного из основоположников этой школы, Петерсена, которая под названием „Искусственное превращение элементов“ недавно вышла в русском переводе.

Точно определить вероятность расщепления ядра, т. е. указать, на сколько неудачных „ α -выстрелов“ приходится удачное попадание, разносящее „в щепы“ цель — атомное ядро, довольно трудно. Для этого необходимо подсчитать число H -частиц, рассеянных во всех направлениях, что очень нелегко, вследствие неоднократно нами указанной большой редкости удачных столкновений. Однако, ограничиваясь в высшей степени приблизительной оценкой, допускающей ошибку в два-три раза, можно на основании опытов Резерфорда с алюминием утверждать, что на каждый миллион бомбардирующих α -частиц с пробегом в 7 см произойдет не более семи-восьми удачных попаданий, сопровождающихся выбрасыванием из ядра H -частицы. Для более тяжелых элементов (как хлор, аргон, калий) вероятность дезинтеграции еще значительно меньше и не превышает одной миллионной.

Когда думаешь в эти цифры, становится понятным, на какую громадную работу самоотверженно пошли два исследователя школы Резерфорда Блекетт и Гаркинс, поставившие себе целью заснять с помощью камеры Уильсона самый процесс разрушения атомного ядра ударом α -частицы. Вместе с тем их работа была действительно необходима по следующим соображениям. Описанные выше опыты Резерфорда и Чадвика сводились к регистрации на экране вспышек — результатов ударов H -частиц, образовавшихся при распаде ядра. В них исследователи фиксировали только одну точку на пути осколка ядра именно — его конечную точку. Этот метод не давал никаких сведений о движении остальной части ядра и α -частицы. Наиболее наглядным, и, пожалуй, единственным средством изучения всего процесса разрушения ядра является камера Уильсона, поэтому ею

и решили воспользоваться Блекетт и Гаркинс. Так как вероятность разрушения ядра необычайно мала—например, для наиболее удачных условий (азот) не превышает 20 случаев дезинтеграции на миллион падающих частиц,— сразу стало очевидно, что прежде чем посчастливится заснять удачный момент, понадобится снять громадное количество фотографий путей α -частиц в газе.

Опыты Блекетта Поэтому камера Уильсона была сконструирована так, что фотографии производились раз за разом, автоматически, через каждые 10 или 15 секунд. Фотографировались одновременно два снимка перпендикулярно друг к другу, чтобы получались две проекции путей и выяснялось их расположение в пространстве. Источ-

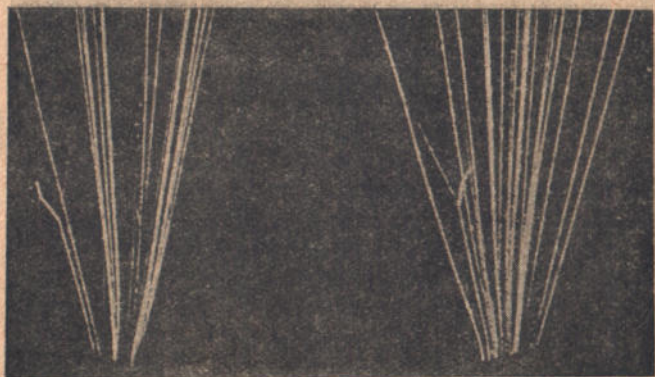


Рис. 29

ником α -лучей у Блекетта служил препарат из радия *В* и *С*, испускавший два сорта частиц с пробегами 8,6 и 4,8 см. Камера была заполнена азотом с небольшой примесью кислорода, в присутствии которого, как оказалось, следы пробегов α -частиц в камере Уильсона получаются более резкими. Среднее число путей, заснятое на каждой фотографии, равнялось восемнадцати, а всего было снято двадцать три тысячи фотографий, на которых запечатлено около 270 000 путей α -частиц с пробегом в 8,6 см. и около 145 000 путей с четырехсантиметровым пробегом.

Среди этих фотографий встречается большое количество снимков путей, заканчивающихся „вилками“, о которых мы уже говорили в предыдущей главе и которые указывают на то, что α -частица на своем пути подошла очень близко к ядру, вступив с ним в сильное взаимодействие или, говоря более просто, хотя и более грубо, α -частица попала в цель, упруго ударившись в ядро, но не разрушив его. Однако среди, примерно, четырехсот тысяч путей оказалось восемь, заканчи-

вающихся необычными вилками. Две из них приведены на рис. 29 и 30. На них зафиксировано разрушение ядра, т.е. вылет из него протона при ударе α -частицы.

Каждая из этих вилок состоит всего из двух ветвей. Одна из них, очевидно, не что иное, как путь выбитого протона. Она представляет собой тонкий, длинный и прямой след, совершенно сходный со следом естественной H -частицы (рис. 23), вдоль которого ионизация значительно слабее, чем на пути α -частицы. Вторая ветвь — короткий жирный след, по внешнему виду сходный со следом ядра азота в случае обычной вилки. Ни на одной из восьми фотографий нет ни малейшего указания

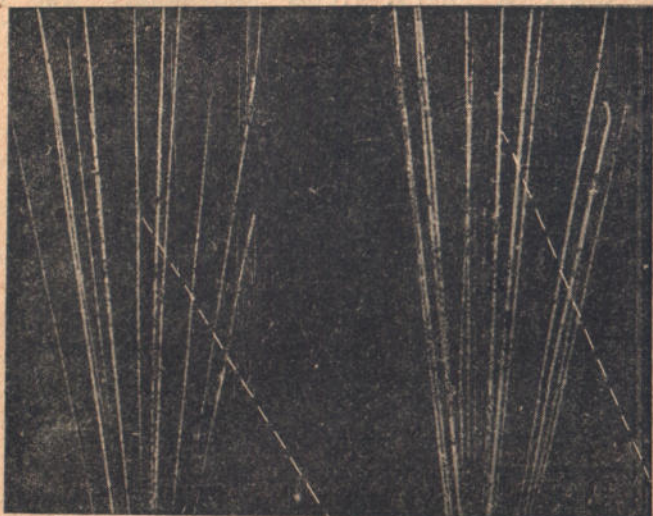


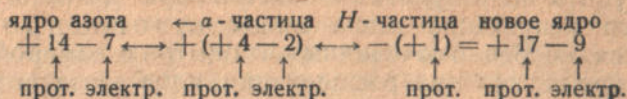
Рис. 30

на третий след, соответствующий α -частице после столкновения.

Трудно себе представить, что α -частица, проскочившая сквозь потенциальный барьер, окружающий ядро, могла бы его покинуть, не обладая скоростью, достаточной для того, чтобы оставить след в камере Уильсона. Так как этих следов на фотографиях нет, приходится заключить что α -частица, выбившая из ядра протон, остается внутри его, не будучи „в силах“ выбраться сквозь потенциальную стену после того, как ею была затрачена значительная часть энергии на вырывание протона.

Таким образом, в результате столкновения ядро азота, состоявшее из 14 протонов и 7 электронов (атомный вес 14, атомный номер 7), превращение азота в кислород теряет протон, но захватывает α -частицу (4 протона и 2 электрона), благодаря чему его масса (атомный вес)

возрастает до 17, а число внутриядерных электронов увеличивается на 2, и, следовательно, заряд ядра (атомный номер) становится равным 8, согласно следующей схеме:



Новое ядро уже не является ядром азота, так как атомный номер его (17—9) равен 8 и соответствует кислороду. Так как атомный вес нового ядра 17 (а кислорода 16), мы имеем дело с превращением азота в изотоп кислорода.¹ Эти рассуждения подтверждаются подсчетами, которые можно сделать на основании фотографий Блекетта. Измерив точно углы, которые составляют путь падающей α -частицы, H-частицы и отброшенного ядра, а также скорость α -частицы (учтя потерю скорости на пути, пройденном от препарата до места столкновения с ядром), можно подсчитать скорость выброшенного протона, а сравнив пробег нового ядра со следом ядра азота в нормальных вилках, можно убедиться в том, что оно обладает атомным номером 8 и массой 17. Таким образом, не остается сомнения в том, что при разрушении ядра азота происходит образование нового элемента с испусканием протона и поглощением α -частицы, т. е. осуществляется превращение элементов, — заветная мечта многих поколений исследователей.

Однако этими сведениями о процессе разрушения ядра азота не исчерпывается то, что можно извлечь из опытов Блекетта. В самом деле, выяснив массу и скорость частиц, образовавшихся в результате столкновений ядра с α -частицей, можно подсчитать энергию их после столкновения и сравнить ее с энергией падающей α -частицы. Произведя этот подсчет, Блекетт установил, что кинетическая энергия частиц после столкновения в среднем на 20% меньше энергии налетевшей α -частицы. Это непосредственно указывает на устойчивость ядра азота, на то, что при его преобразовании в ядро O_{17} происходит поглощение энергии.

Подведем теперь краткий итог тем сведениям о строении ядра, которые были получены в результате опытов по дезинтеграции. Бомбардировкой α -частицами удалось разрушить ядра элементов от бора до калия, за исключением двух элементов: углерода и кислорода. В связи с самыми новыми опытами, о которых нам еще предстоит говорить, необходимо еще раз указать на то, что при этих опытах не удалось разбить также ядра самых легких после водорода и гелия элементов — лития и бериллия (третьего и четвертого элемента с атомными

¹ Существование изотопа кислорода O_{17} было впоследствии доказано оптическим методом.

весами 7 и 9). Во всех случаях в результате дезинтеграции вылетает водородное ядро (протон, H -частица). Не удалось заметить выбивания каких бы то ни было иных частиц. Насколько можно судить по результатам опытов при дезинтеграции, наблюдается испускание всего лишь одного протона, что становится особенно очевидным из опытов с камерой Уильсона. В то время, как при расщеплении ядра азота подсчет энергии продуктов распада ядра по сравнению с энергией падающей α -частицы показывает уменьшение энергии, в некоторых случаях, например, при выбивании протонов из ядер алюминия, энергия „осколков ядра“ больше энергии налетевшей α -частицы. Таким образом, в некоторых случаях дезинтеграция происходит с поглощением энергии, тогда как в других, наоборот, при ударе α -частицы ядро как бы взрывается с выделением энергии.

Вероятность разрушения ядер при бомбардировке α -частицами меняется от элемента к элементу. Хотя опытный материал, на котором основаны два последующих утверждения, довольно беден, все же можно заметить некоторую разницу в поведении четных и нечетных элементов (т.е. элементов с четным или нечетным атомным номером или, иначе, зарядом ядра). Как правило, теми же α -частицами из „нечетных“ ядер выбиваются более быстрые протоны, чем у четных, и притом для нечетных дезинтеграция происходит чаще. В связи с этим интересно отметить, что оба оставшихся неразбитыми элемента, вклинивающиеся в серию подвергнутых разложению легких элементов от бора до калия, принадлежат к четным (атомный номер 12 и 14). В то же время первые удачные эксперименты с разрушением ядер относились к шести нечетным элементам (кончая фосфором), для остальных же четных легких элементов дезинтеграции были реже и давали менее быстрые протоны, так что они были разложены только „во вторую очередь“.

Разница в свойствах четных и нечетных элементов проявляется и в других отношениях. Гаркинс, например, отметил, что в природе как в „непосредственно окружающей нас“ (земная кора), так и, повидимому, во вселенной, судя по составу упавших из мирового пространства метеоритов, значительно более распространены четные, нежели нечетные элементы. Астон установил, что нечетные элементы обладают в лучшем случае двумя изотопами, атомный вес которых отличается на две единицы, тогда как четные элементы часто обладают целым семейством изотопов, массы которых меняются в довольно широких пределах.

Все эти факты говорят за то, что четные ядра построены прочнее нечетных. Это заключение подтверждается для легких элементов точными данными об их атомных весах, полученных Астоном с помощью его масс-спектрографа.

Данные Астона
о дефекте массы
для легких эле-
ментов

Как мы уже говорили в главе второй, масса ядра в большинстве случаев не равна в точности сумме масс электронов и протонов, из которых оно состоит. Эти небольшие поправки для некоторых элементов вполне измеримы, а для других практически незаметны; мы говорили также, что этот дефект массы связан с устойчивостью ядра и определяется тем количеством энергии, которое испускается при разрушении ядра.

На основании своих опытов Астон приходит к выводу, что для легких элементов нечетные атомы обладают значительно большим дефектом массы, чем четные, что опять-таки указывает на менее прочную связь частей, из которых построены ядра нечетных легких элементов. Более того, судя по всей совокупности опытов по искусственному разложению ядер, а особенно по опытам Блекетта с камерой Уильсона, дезинтеграция заключается в поглощении α -частицы с испусканием протона. При этом разрушающееся нечетное ядро превращается в четное. По Астону, дефект массы при этом превращении должен уменьшиться, иными словами—часть массы должна исчезнуть. Мы уже знаем, что это означает. „Исчезновение“ массы должно сопровождаться „появлением“ энергии, которое мы и наблюдаем в виде громадной живой силы быстрых протонов, выбрасываемых при дезинтеграции именно нечетных элементов.

Новейшие ис-
следования ис-
кусственного
разрушения
ядер

За последние годы наши знания об искусственном превращении ядер обогатились рядом новых сведений, что было обусловлено в основном развитием новых электрических методов счета α -частиц и протонов, о которых мы говорили в предыдущей главе и которые заменили весьма полезный, но вместе с тем чрезвычайно утомительный и несовершенный метод спинцилляций. Позе первому удалось показать, что протоны, испускаемые при дезинтеграции алюминия, могут быть разделены на несколько групп с вполне определенными скоростями. Его исследования были продолжены Мейтнер и Боте в Германии, де-Брольи и Ренгэво в Франции и Чадвиком и Констэблем в Англии.

Чадвик и Констэбль, например, разделили протоны, выброшенные из алюминия при бомбардировке α -частицами полония, на восемь резко различающихся по скоростям групп. Для объяснения наблюдаемых закономерностей этим исследователям пришлось допустить, что протоны и α -частицы подвергаемого бомбардировке ядра различно связаны с последним, занимая, как говорят, разные уровни энергии, подобно электрону в оболочке атома.

Далее, по предложению Гернея было сделано предположение, обоснованное представлениями волновой механики, о том,

что при столкновении с ядром α -частица будет иметь значительно больше шансов проникнуть сквозь потенциальный барьер в тех случаях, когда ее энергия близка к возможной энергии α -частицы или протона в ядре. При бомбардировке ядер α -частицами с определенной энергией происходит испускание протонов с двумя различными скоростями. Это, повидимому, указывает на существование двух различных „способов“ проникновения α -частиц в ядро. Подобные же результаты были получены и для других легких элементов; они дали кое-какие сведения о значениях энергии внутриядерных протонов и α -частиц, и надо надеяться, что применение более быстрых α -частиц, чем те, которые испускаются полонием, помогут разобраться в схеме „энергетических уровней“ ядер легких элементов и тем самым значительно расширят наши сведения о внутреннем строении ядра.

Мы видели из этого короткого обзора исследований результатов бомбардировки легких элементов α -частицами ядер, что ими раскрыта целая новая интереснейшая область „интимнейшей“ структуры вещества. Немногие вспышки зеленоватого света, чуть видные в поле зрения микроскопа, восемь фотографий — плод многолетней упорной работы настойчивых исследователей дали нам сведения о чудовищных взрывах и катастрофах в мире атомов, опрокинули непоколебленное работой нескольких поколений ученых представление о „непревратимости“ элементов, наконец, сообщили ряд ценнейших сведений о размерах, строении и „энергетическом хозяйстве“ ядер. Нет сомнения в том, что постановка знаменитых опытов Резерфорда и его школы, а также их выводы из очень скудных, на первый взгляд, опытных материалов представляют образец блестящего научного исследования и являются результатом многолетней целеустремленной работы в определенном направлении.

Однако нельзя не признать, что по сравнению со всем объемом проблемы строения ядра эти опыты еще очень ничтожны. В самом деле, в результате их не только не стала яснее структура ядра, не только мы не можем „рассчитать“ ядро так, как может сейчас быть рассчитана электронная оболочка атома, но мы даже не уверены в самых основных фактах, положенных в основу всех наших новых представлений.

Самая возможность параллельного существования двух школ (кембриджской и венской), которые из своих опытов делают диаметрально противоположные выводы по основным вопросам: 1) какие элементы удалось подвергнуть дезинтеграции, 2) какова вероятность дезинтеграции для различных элементов, 3) какова минимальная энергия α -частиц, способных вызвать дезинтеграцию, и др., — указывает на то, что что-то неладно в этой области исследования. И это первое впечатление не обманывает. Дей-

ствительно, дело в том, что при том арсенале, который применяется физиками для разрушения ядра, эти разрушения—событие слишком редкое.

Пожалуй, ни в одной другой области физики не приходится делать таких важнейших выводов из единичных в сущности результатов опыта. Восемь фотографий Блекетта это, в конце концов, недостаточно прочный фундамент для построения исчерпывающей картины разрушения ядра. А какого громадного количества труда потребовали эти восемь фотографий! Ведь они отобраны из двадцати трех тысяч удачных снимков. Если положить на фотографирование каждого (включая регулировку камеры Уильсона, подготовку фотоаппарата, источника света и проч.) по две минуты, а на проявление снимков, дальнейшую обработку и отбор фотографий с „необычными путями“ еще по две минуты, то мы увидим, что и этот, явно преуменьшенный, подсчет дает девяносто тысяч минут, то-есть около двухсот пятидесяти шестичасовых человекоднев! Тут сразу становится понятным все несовершенство орудия исследования, которое представляют собой α -частицы.

Не имея возможности увеличить число α -частиц, испускаемых препаратом, путем увеличения количества радиоактивного вещества (эти вещества в виду своей чрезвычайной редкости ценятся необычайно высоко: один грамм радия стоит свыше двухсот тысяч золотых рублей); используя, кроме того, ничтожную часть всех испускаемых α -частиц (так как они выбрасываются препаратом во все стороны, а направить их, вследствие их громадной скорости и значительной массы, не представляется возможным); и, наконец, не имея возможности поставить исследования с другим типом снарядов для обстрела ядер, — работники ядерной физики оказываются в тяжелом положении.

Немудрено поэтому, что в течение многих лет ряд исследователей делал попытки добиться разрушения ядер и превращения элементов другими способами. Сколько раз в печати мелькали сенсационные сообщения о блестящих успехах в этом направлении и сколько горьких разочарований пришлось испытать современным алхимикам, искренно убежденным в том, что им, наконец, удалось разрешить тяжелую задачу!

Мы здесь умышленно не останавливаемся на попытках, которые были сделаны учеными, ставшими на правильный путь— путь получения чрезвычайно быстрых заряженных частиц, разогнанных в сверхвысоковольтных разрядных трубках, если можно так выразиться,—на путь суррогатирования естественных α - и β -частиц. Они будут изложены в следующих главах, а пока опишем несколько неудачных попыток, наделавших в свое время много шума и оставивших даже по настоящее время в довольно широких, но недостаточно критических кругах впечатление великих достижений.

Другие попытки превращения элементов

Эти попытки сводятся к самым разнообразным мерам воздействия на подлежащие превращению вещества. В некоторых случаях в результате длительного пропуска тока через разрядные трубки (при не особенно высоких напряжениях) получались газы, которых будто бы не было в трубке до начала разряда; в других — мощным разрядом конденсаторной батареи взрывались тонкие проволоки из тугоплавкого металла, якобы нацело превращаясь в гелий. Однако критическое исследование всех этих методов показало, что их „удачные“ результаты неизменно объяснялись непредусмотренным исследователем источником ошибок. Вещество, которое, по мнению исследователей, авторов данного метода, „образовывалось“ из какого-либо другого элемента, преспокойно находилось в приборе с самого начала опыта.

Возбуждившие наибольшие толки эксперименты подобного рода были проведены небезызвестным химиком Мите и его сотрудником Шгаммрейхом в Берлине в 1924-25 г., которые встретили единомышленника в лице японского физика Нагаока, пришедшего другим путем к аналогичным результатам и совершившим ту же ошибку, что и Мите при толковании своих опытов.

Кажущееся превращение ртути в золото

Пропуская в течение нескольких сот часов довольно значительный ток через обычную ртутную дуговую лампу, Мите по окончании опыта, путем химического анализа установил в ртути, вылитой из этой лампы, присутствие золота и притом в количествах, которые можно было обнаружить на чувствительных весах. В результате этого опыта Мите пришел к заключению, что им открыт способ превращения элементов, осуществляющий эти превращения в масштабе, в миллиарды раз превышающем то, что имело место в опытах по превращению элементов при бомбардировке α -частицами.

Рассуждения Мите на первый взгляд кажутся достаточно убедительными. В самом деле, заряд ядра ртути (+80) всего на единицу больше, чем у золота (+79). Достаточно загнать один электрон в ядро ртути, чтобы получить атом с зарядом 79, т. е. атом золота. А ведь при прохождении тока в ртутном паре дуги движется громадное количество электронов. Вместе с тем, благодаря положительному заряду ядра вряд ли нужно очень много энергии, чтобы „влепить“ в это ядро один лишний электрон. Так думал Мите. Хотя в последнем рассуждении он и не прав, так как, несомненно, в ядре существует какой-то неизвестный нам механизм, препятствующий проникновению внутрь его электронов, и только присутствием его можно объяснить долговечность нерадиоактивных ядер, окруженных все время электронным облаком,—все же сама постановка вопроса отнюдь не являлась нелепой. Однако в этом случае „золото из ртути“ должно было бы по атомному весу отличаться от обычного золота. Атомный вес ртутного золота должен был бы

равняться атомному весу одного из изотопов ртути, чего в действительности не оказалось. „Золото Мите“ оказалось обычным золотом.

Вскоре известный немецкий химик Габер, заслуживший печальную славу изобретателя химической войны, повторил опыты Мите; оказалось, что примесь золога в ртути не росла со временем пропускания тока через трубку и, повидимому, объяснялась примесью золота в исходном продукте. Этот метод превращения ртути в золото был окончательно оставлен после опытов, поставленных в Америке с исключительно чистой ртутью, в результате которых было установлено, что если в ртути не было золота до пропускания разряда через дугу, то его не оказывается и после разряда.

Таким образом, и эта поздняя алхимическая попытка была присоединена к коллекции разбитых иллюзий искателей философского камня. Аналогичная судьба постигла „открытие“ двух молодых голландских ученых, будто бы превративших в ртуть таллий и свинец путем пропускания сильного тока.

Таким образом, до последнего времени (март 1932 г.) бомбардировка α -частицами была единственным приемом, с помощью которого удалось осуществить разрушение ядра и превращение элементов. Мы уже говорили о том, что затруднения, которые возникают при применении этого метода, заставили перейти к изысканию иных методов преодоления устойчивости ядра, в основном сводящихся к суррогатированию α -частиц в виде пучка ионов, ускоренных в разрядных трубках на несколько миллионов вольт. Последние увенчавшиеся успехом опыты в этом направлении говорят за то, что недалек тот час, когда „искусственные“ α - и H - частицы смогут при исследовании атомного ядра полностью заменить „естественные“.

Однако, прежде чем быть вытесненными из арсенала исследователей новым более мощным оружием, α - частицы в руках хорошо известного нам Чадвика „спели свою лебедию песню“, приведя к открытию, представляющему достойное продолжение опытов Резерфорда и являющемуся, пожалуй, самым крупным шагом в исследовании процессов разрушения ядра после открытия разрушения ядра азота в 1919 г. Речь идет об открытии нейтронов, существование которых в настоящее время, после серии опытов ряда исследователей, можно считать доказанным.

Для того чтобы разобратся в том, каким образом в физику ядра вошло это „новое действующее лицо“ — нейтрон, частица нейтральная, т. е. не обладающая зарядом, — нам придется бегло познакомиться с теми опытами, на основании которых была создана „гипотеза нейтронов“.

Опыты Боте и Беккера в 1930 г. удалось показать, что Беккера (γ -лучи некоторые легкие элементы, подвергнутые бомбардировке α - частицами полония, испускают γ -лучи. Наиболее заметным это явление было у бериллия.

Более поздние опыты Боте (в Германии), Кюри-Жолио (во Франции) и Уэбстера (в Англии) показали, что эти бериллиевые γ -лучи обладают большей проникающей способностью, чем все до тех пор исследованные „естественные γ -лучи“; именно после прохождения слоя свинца, толщиной в четыре сантиметра, они ослабевают менее, чем наполовину.

Зная проникающую способность этих лучей, можно было определить и их энергию. Этот подсчет привел Уэбстера к заключению, что проникающее излучение бериллия является результатом захвата α -частицы ядром бериллия, при чем последнее превращается в ядро изотопа углерода с атомным весом 13 ($\text{Be}_9 + \alpha_4 = \text{C}_{13}$), а избыточная энергия излучается в виде очень жестких γ -лучей.

Опыты Кюри-
Жолио

Совсем недавно (работа напечатана в 1932 г.) Кюри-Жолио, дочь знаменитого Кюри, впервые добывшего радий, вместе со своим мужем Жолио, сделали поразительное наблюдение. Пропуская „бериллиевые лучи“ через тонкое окошко в ионизационную камеру (см. главу четвертую), они, что нисколько не удивительно, обнаруживали незначительную ионизацию; однако, прикрыв окошко слоем парафина или другого вещества, содержащего в значительных количествах водород, они убедились в резком увеличении тока через ионизационную камеру. Дальнейшие опыты показали, что излучение бериллия выбивает из парафина протоны с пробегам до 26 см и скоростью около 30 000 км в секунду.

Можно было думать, что γ -лучи бериллия вырывают протоны, подобно тому, как они вырывают электроны—явление, которым широко пользуются при исследовании γ -излучения. Однако такое толкование встретило два серьезных затруднения. Передача части энергии жестких лучей электронам, при которой электрон приобретает кинетическую энергию, увеличивая свою скорость, а лучи теряют часть своей энергии, что сопровождается уменьшением их частоты,—явление хорошо известное и изученное под названием эффекта или явления Комптона.

Зная скорость, а следовательно и энергию выброшенного γ -лучами электрона, можно легко подсчитать энергию излучения, выбросившего этот электрон. Кроме того, нетрудно определить вероятность вырывания электрона, т. е. число электронов, которое может быть выброшено при данной интенсивности γ -лучей.

Произведя эти вычисления для наблюдаемых ими протонов, Кюри и Жолио пришли к явному противоречию: во-первых, число выброшенных протонов во много тысяч раз превышало вычисленное, во-вторых, энергия лучей бериллия оказалась раз в двадцать больше, чем у самых жестких до сих пор известных γ -лучей, и оставалось совершенно непонятным, откуда может взяться эта чудовищная энергия.

В самом деле, предполагалось, что при бомбардировке бериллия α -частицами происходит захват α -частиц ядрами бериллия и превращение их в изотоп углерода C_{13} . Зная, по данным Астона, дефект массы для C_{13} , можно было подсчитать изменение массы при этом превращении и вычислить из него максимальную энергию, которая может быть выделена в виде γ -лучей. Эта энергия в лучшем случае составляет не более одной трети от чудовищной энергии, вычисленной из скорости протонов в опытах Кюри и Жолио.

Опыты Чадвика Для выяснения природы загадочного излучения бериллия, которое, судя по результатам опытов Кюри и Жолио, не могло быть обычным γ -излучением, ряд опытов был поставлен Чадвиком. Пользуясь ионизационной камерой и электрическим счетчиком, состоявшим из усилительной установки с автоматической регистрацией толчков тока, которые вызывались появлением внутри камеры ионов, вырванных быстрыми заряженными частицами, Чадвик убедился, прежде всего, в том, что излучение бериллия вырывает не только быстрые протоны из соединений, содержащих водород, но и вызывает появление быстрых заряженных частиц, попадая и на другие легкие элементы. Таким образом им были исследованы литий, бериллий, бор, углерод и азот, которые он помещал перед окошком ионизационной камеры (азот и литий в виде химических соединений), и водород, гелий, азот, кислород и аргон, которыми он наполнял камеру. Во всех случаях счетчик давал отбросы регистрирующего приспособления, что указывало на вырыв заряженных частиц из исследуемых элементов. Судя по пробегу, эти частицы представляли не что иное как „атомы отдачи“, т. е. атомы исследуемого вещества, претерпевшие столкновения с чем-то, что испускалось бериллием под влиянием α -бомбардировки. Помещение между бериллием и исследуемым веществом слоя свинца толщиной около двух сантиметров заметно не отражалось на количестве выброшенных излучением бериллия атомов отдачи; это указывало на громадную проникающую способность этого излучения.

Пути атомов отдачи были сфотографированы Чадвиком и Фитцером с помощью камеры Уильсона; после их тщательного изучения можно было с большой степенью достоверности утверждать, что представление об излучении бериллия, как о γ -излучении, должно быть отброшено, так как для объяснения длины наблюдаемых пробегов атомов отдачи пришлось бы допустить, что это излучение еще в два-три раза жестче, т. е. обладает в два-три раза большей энергией, чем это следует из опытов по „облучению“ водорода, а такой энергии, как мы видели, при поглощении α -частиц ядрами бериллия взяться неоткуда.

Нейтроны

Положение казалось безвыходным. И здесь-то Чадвик сделал неожиданное, невероятное и вместе с тем единственно возможное предположение, объясняющее

все несообразности, обнаруживающиеся при попытках отождествить излучение бериллия со „сверхжесткими γ -лучами“. Дело в том, что γ -излучение, падая на какую-либо частицу, может передать ей только небольшую часть своей энергии. Отсюда и получаются те громадные значения энергии γ -лучей бериллия, которые были подсчитаны Кюри, Жолио и Уэбстером.

Если же предположить, что излучение бериллия — не электромагнитное колебание, а поток быстро несущихся частиц, то выход из затруднения найден: эти частицы могут при столкновении с атомами передать им значительную часть своей энергии, в некоторых случаях — даже полностью всю свою энергию (случай центрального удара двух бильярдных шаров одинаковой массы). Таким образом, образование быстрых атомов отдачи, наблюдаемых в камере Уильсона или зафиксированных электрическим счетчиком, при таком объяснении излучения бериллия вовсе не требует чудовищных значений энергии, которым неоткуда взяться.

Определяя скорости атомов отдачи по их пробегаем, Чадвик сумел подсчитать и массу частиц, из которых состоит излучение бериллия. Она оказалась очень близкой к единице, т. е. массе водородного атома или протона. Однако снаряды, вылетающие из бериллия, не могли быть ни протонами, ни, тем более, атомами водорода. Пролетая с большой скоростью мимо окружающих атомов, атом водорода мгновенно потерял бы свой электрон, превратившись тем самым в голое ядро водорода — протон. Но и протоны не могли бы с такой легкостью пролетать сквозь свинцовые слои, толщина которых измерялась сантиметрами. Чтобы пролететь такой слой свинца, протон должен был бы обладать настолько чудовищной энергией, что перед ней бледнеет даже гигантская энергия γ -лучей, которая была определена на основании первых опытов с бериллиевым излучением.

Частицы, из которых, по мнению Чадвика, должно состоять это излучение, обладая массой протона, должны вместе с тем отличаться проникающей способностью, превышающей во много тысяч раз проникающую способность самых быстрых протонов, полученных путем дезинтеграции алюминия. Скорость этих частиц не может быть особенно большой (с одной стороны потому, что неоткуда взяться соответствующей энергии; с другой, потому, что вычисления, основанные на скоростях атомов отдачи, выбитых излучением бериллия, показывают, что, если они действительно вызваны ударом частиц с массой около единицы, то скорость этих частиц до удара не более 30—40 000 км/сек.).

Единственным объяснением громадной проникающей способности этих частиц может быть то, что они необычайно слабо взаимодействуют с атомами, встречающимися на их пути, почти не растрачивая своей скорости и пролетая даже через такие

труднопроходимые скопления атомов с громадными ядерными зарядами, какими являются слои свинца. Это возможно только в том случае, если эти частицы, в отличие от всех элементарных частиц, с движением и взаимодействием которых мы до сих пор сталкивались, не обладают зарядом и являются нейтральными.

В этом и заключается смысл предложения Чадвика, которое одним ударом разрушает загадочный узел, запутавшийся вокруг проблемы бериллиевого излучения.

В нескольких словах мысль Чадвика такова. Под действием бомбардировки бериллий (один из легких элементов, из которых в опытах Резерфорда выбить протонов не удалось) выбрасывает нейтроны, — частицы с массой, равной массе протона, но лишённые его заряда. Ввиду отсутствия заряда эти частицы очень слабо взаимодействуют со встречающимися на своем пути ядрами, вследствие чего они, несмотря на не слишком большую скорость, обладают громадным пробегом. При очень „удачном“ попадании в ядро атома они передают ему значительную часть своей энергии, которая и затрачивается на приведение в движение подстреленного ядра (атом отдачи). Не имея заряда, нейтроны образуют на своем пути ничтожное количество ионов; поэтому их нельзя непосредственно обнаружить ни одним из широко применяемых при исследовании ядер методом (ионизационная камера и счетчики, камера Уильсона, сцинтилляции), и только очень мощный поток нейтронов можно заметить по образованию ничтожного количества атомов отдачи. Нейтроны выбиваются из ядер бериллия,¹ следовательно, они являются одной из составных частей этого ядра, а может быть входят в состав ядер и других элементов.

Открытие нейтронов совершенно разрушает прежнее наше неполное представление о строении ядер элементов. Как и всякое „свежее“ открытие, оно еще кажется слишком необычайным, отчасти даже невероятным. Нейтроны еще не завоевали себе прочного положения среди прочих представлений, с которыми мы оперируем в ядерной физике. Мы еще не вывели пока почти никаких заключений из этого открытия: очередной сдвиг в наших представлениях о внутреннем строении материи, связанный с важнейшим открытием Боте, Кюри — Жолио и Чадвика, только начался.

Мы не знаем почти ничего о внутренней природе самих нейтронов; вопрос о том, являются ли они каким-либо особым видом частиц, каким-то „третьим типом кирпичей мироздания“, наряду с электронами и протонами, или образованием из протона и электрона, необычайно прочно связанных друг с другом, — остается открытым.

¹ В опытах Чадвика есть указания и на то, что следующий за бериллием элемент — тор под действием α -бомбардировки также испускает нейтроны; однако это заключение менее достоверно.

Точно так же остается совершенно неясным, какую роль играют нейтроны в строении атомных ядер, хотя уже имеются указания о том, что представление о нейтронах сможет пролить свет на ряд самых сложных и запутанных проблем атомной физики; но это все дело дальнейшего исследования. То, что с довольно значительной степенью достоверности вытекает из опытов с бериллиевым излучением, сводится к следующему: бериллий, один из легких элементов с атомным номером 4 и атомным весом 9, под действием α -бомбардировки обнаруживает новый, неизвестный до сих пор тип искусственного разрушения ядер. Он сводится, повидимому, к поглощению α -частицы ядром и испусканию нейтрона.

В результате этого процесса атомный номер (заряд ядра) бериллия увеличивается на две единицы, а атомный вес (масса ядра) на три, т. е. происходит превращение бериллия (Be_9) в углерод (C_{12}), сопровождающееся вылетом нейтрона, частицы с массой 1 и зарядом 0, обладающей довольно значительной скоростью (30—40000 км/сек) и громадной проникающей способностью.

Это явление, повидимому, не более частое, чем дезинтеграция ядер других легких элементов, хотя на основании полученных данных еще нельзя с точностью определить вероятность такого разрушения ядра при столкновении α -частиц с атомами бериллия. При исследовании этого интереснейшего явления, как и вообще при изучении искусственного разрушения ядер и превращения элементов, ощущается с особой остротой несовершенство α -бомбардировки как средства для изучения структуры ядра. В связи с этим становится совершенно понятным, что с каждым годом внимание исследователей, работающих в области изучения строения ядра, все более сосредоточивается на усовершенствовании методов этого исследования, на замене естественных α -частиц их суррогатом — ионами, ускоренными в разрядных трубках сверхвысокого напряжения. В следующих главах мы познакомимся с основными направлениями работы в области построения источников высокого напряжения и разрядных трубок и с тем успехом, которым увенчались эти работы.

VI. ИСКУССТВЕННЫЕ МОЛНИИ И ИОННЫЕ ПУШКИ

Мы видели, что силы, связывающие составные части атомных ядер, необычайно велики. В течение многих десятилетий атомные ядра противостояли всем воздействиям, которым их подвергали сотни исследователей, и только используя внутриядерную энергию, за счет которой при радиоактивном распаде с чудовищной скоростью выбрасываются α -частицы, удается проникнуть в недра ядра и вызвать таким образом его разрушение.

Как получить
быстрые
ионы

Задавшись целью суррогатировать естественные α -частицы, исследователи должны были изыскать способ придать предназначенным для разрушения ядра частицам скорости, близкие к тем, которыми обладают естественные α - и H -частицы и даже значительно большие. Хотя на пути к этой цели можно было предвидеть громадные затруднения, все же цель казалась заманчивой благодаря тому, что число заряженных частиц, т. е. интенсивность бомбардировки, могла быть во много раз больше, чем при исследовании с помощью естественных α -частиц.

В самом деле, из радиоактивных измерений известно, что один грамм радия, находящийся в равновесии со всеми своими продуктами распада, испускает в секунду примерно 35 миллиардов α -частиц. Учитывая, что в распоряжении исследователей редко бывают препараты радия в количестве, превышающем несколько миллиграмм, и что α -частицы испускаются во всевозможных направлениях, так что в лучшем случае при исследованиях по разрушению ядер удастся использовать не более сотой части всего α -излучения,— в громадном большинстве случаев приходится обходиться относительно малой интенсивностью α -бомбардировки, во всяком случае не превышающей нескольких десятков тысяч α -частиц в секунду. Вместе с тем, при разгоне заряженных частиц в сосуде с разреженным газом мы без труда можем получить токи около одной тысячной ампера. При таком токе поток ионов, движущихся в трубке, измеряется числом около 5×10^{15} (пятьдесят миллионов миллиардов) частиц в секунду, так что, если бы только этим частицам придать скорость α -частиц, то наш сосуд — «ионная пушка» — по числу выбрасываемых снарядов соответствовал бы полутонне радия, при чем все частицы выбрасывались бы в одном направлении, т. е. сравнение оказалось бы еще раз в тысячу выгоднее в пользу ионной пушки.

Каким же образом получить столь быстрые частицы? Ответ на это напрашивается сам собой. Так как речь идет об ионах, частицах заряженных, то на них необходимо воздействовать электрическим полем, воспользовавшись тем, что на заряженный ион, находящийся в электрическом поле, станет действовать электрическая сила, которая будет ускорять его во все время его полета в поле.

Измерение скорости заряженных частиц в вольтах

Подобно тому, как бомба, сброшенная с самолета, ускоряет свое движение в течение всего времени своего полета, приобретая в конце его тем большую скорость, чем с большей высоты она сброшена,— заряженная частица, ускоренная в разрядной трубке, движется тем быстрее, чем выше приложенное к трубке напряжение. Кинетическая энергия частицы приобретается за счет работы электрических сил, выражающейся произведением ее заряда на пройденную разность потенциалов. Так как для сообщения заряженным частицам большой ско-

рости пользуются исключительно методом ускорения в электрическом поле, то исследователи, работающие с быстрыми заряженными частицами, обычно выражают скорость частиц в вольтах, при чем, говоря „частицы со скоростью, допустим, в сто тысяч вольт“, понимают под этим частицы, обладающие энергией, равной энергии электрона, прошедшего в разрядной трубке разность потенциалов в сто тысяч вольт; α -частицы, энергия которых достаточна для разрушения легких элементов, обладают скоростью в 2—3 миллиона вольт. Скорость самых быстрых α -частиц (длиннопробежных частиц тория C) достигает примерно 4,5 миллионов вольт. Отсюда, видно, что, задавшись целью получить искусственно частицы, способные разрушить атомное ядро, мы должны ускорить ионы в разрядной трубке, приложив к ней напряжение в несколько миллионов вольт. В этом и заключалась нелегкая задача, стоявшая перед исследователями атомного ядра, искавшими нового оружия для его разрушения.

Две части задачи получения сверхбыстрых ионов

Всякий газ, как известно, состоит из громадного количества атомов (или молекул), находящихся в непрерывном быстром и совершенно беспорядочном движении. Отдельные частицы, носясь во всевозможных направлениях в занятом газом объеме, не могут беспрепятственно пролетать значительные расстояния. Они непрерывно сталкиваются друг с другом, при чем число этих столкновений, естественно, растет с увеличением давления газа. В воздухе, при атмосферном давлении, например, каждая частица газа (молекула кислорода или азота) испытывает в среднем около миллиарда столкновений в секунду, пролетая „спокойно“, т. е. не сталкиваясь, расстояния, в громадном большинстве случаев, не превышающие нескольких десятитысячных миллиметра. С уменьшением давления воздуха средние расстояния между двумя столкновениями возрастают приблизительно обратно пропорционально давлению.

Совершенно очевидно, что пытаться ускорить заряженные атомы, сообщить им скорость, достаточную для разрушения ядер, можно только в сильно разреженном газе, обеспечив им беспрепятственный полет в разрядной трубке.

В противном случае при каждом своем столкновении с молекулами газа наши частицы будут терять свою энергию, затрачивая ее на отщепление электронов от оболочки этих молекул, т. е., как мы видели в случае радиоактивных частиц в газе, будут вызывать ионизацию газа вместо того, чтобы набирать на своем пути скорость, необходимую для разрушения ядра.

Таким образом, задача получения „искусственных снарядов“ для разрушения ядер распадается на две главные части: первую — получение высокого напряжения, достаточного для сообщения частицам надлежащей скорости, и вторую — построение

ние соответствующей разрядной трубки с чрезвычайно сильно разреженным газом. При разрешении как первой, так и второй части задачи встречаются серьезные технические трудности, которые различными исследователями разрешаются по-разному, иногда путем остроумнейших приемов и уловок.

В погоне за грозами За последние пять — шесть лет техника получения сверхвысоких напряжений (напряжения, превышающие полмиллиона вольт) сделала гигантский шаг вперед. Почти каждый свежий выпуск электротехнических журналов Германии и Америки приносит известие о новых успехах в этой области. Лаборатории, располагающие источниками напряжения, превышающего миллион вольт, насчитываются уже не единицами, а десятками. Мы, к сожалению, лишены возможности остановиться на последних достижениях техники получения сверхвысоких напряжений и отсылаем интересующихся к нашей книжке из этой же серии, посвященной указанному вопросу.¹ Здесь мы ограничимся только изложением основных принципов получения высоких напряжений, при чем обратим особое внимание на те из них, которые были предложены специально для разрешения проблемы искусственного разрушения ядра и, не имея непосредственного отношения к электротехнике, не были описаны в упомянутой книжке.

Пять лет тому назад техника получения сверхвысоких напряжений стояла на значительно более низком уровне, чем сейчас. В распоряжении исследователей ядра не было источников сверхвысокого напряжения, так как немногочисленные, существовавшие тогда трансформаторные установки технической частоты с напряжением до миллиона вольт, принадлежавшие в основном предприятиям, изготовлявшим элементы изоляций линий передач, повышающих и понижающих подстанций, были вследствие своей дороговизны, громоздкости и большой мощности недоступны исследователям физическим лабораториям. Импульсных генераторов по схеме Маркса на такие напряжения еще не существовало, а вопрос о получении сверхвысоких напряжений с помощью трансформаторов Тесла не был достаточно проработан и не сулил особенных перспектив.

К этому периоду относится попытка использования атмосферного электричества, проведенная тремя молодыми немецкими учеными: Брашем, Ланге и Урбаном,

Названные исследователи выбрали область, богатую грозами, в районе Лугано (северная Италия), и в качестве рабочей площадки использовали седлообразную вершину горы Жемерозо, между двумя пиками которой была подвешена антенна, сперва в форме сетки с исполинскими ячейками, затем, однако, в виде ординарного троса. Длина антенны достигала 600 м, средняя высота над землей — 80 м, а над уровнем моря — около 1700 м.

¹ А. К. Вальтер — Сверхвысокие напряжения — ОНТВУ, 1932 г.

Первым затруднением, с которым пришлось бороться, оказалось образование короны. Это явление заключается в том, газ в области, где электрическое поле достигает величины ок

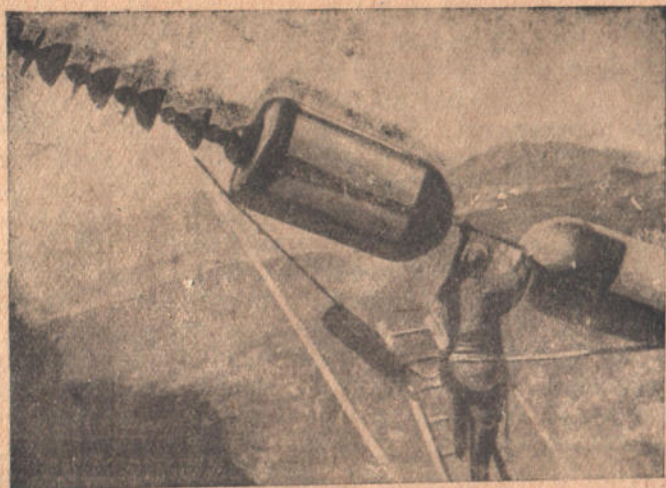


Рис. 31

30 000 вольт на сантиметр, подвергается ионизации, т. е. становится проводящим, что вызывает утечки заряда с изолированн



Рис. 32

системы. Это затруднение удалось несколько обезвредить, называя на тросы защитные цилиндры (рис. 31), благодаря которым поле вблизи проводника делается значительно меньше.

Летом 1927 г. во время грозы на антенне сразу же получилось напряжение около 2,5 млн. вольт, при котором с легкостью были перекрыты изоляторы, служившие подвесом антенны. В 1928 г. гирлянды были удлинены до 40 элементов, но во время первой же грозы, вследствие громадных потенциалов, до которых зарядилась антенна, 13-метровые гирлянды были перекрыты с чудовищным треском.

После этого гирлянды были удлинены до 120 элементов (рис. 32), но при этом вес антенны увеличился настолько значительно, что ее никак не удавалось натянуть достаточно высоко от земли. Тогда вместо изолирующих гирлянд был применен пропитанный изолирующим составом пеньковый канат, и значительно облегченная таким образом система была подвешена на еще большей высоте. Из этой антенны во время грозы сыпались искры, длина которых ограничивалась толь-

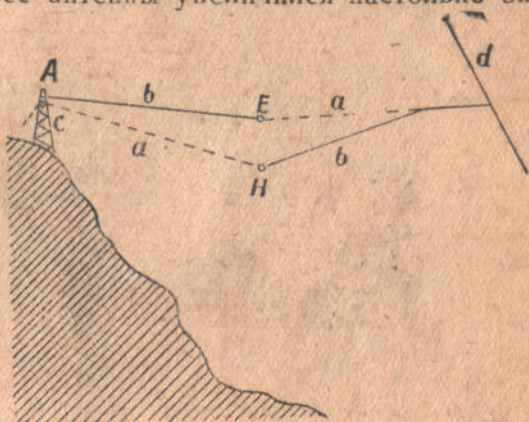


Рис. 33

ко максимальным расстоянием (18 м) в искровом разряднике, устройство и внешний вид которого понятны из рис. 33 и 34.

Такая длина искры при постоянном напряжении или при переменном технической частоты (50 периодов) соответствовала бы 8 миллионам вольт. Так как напряжение антенны в момент удара молнии имело характер кратковременного (0,01 — 0,001 секунды) удара, а при ударном напряжении длина искры значительно меньше, можно думать, что потенциал антенны при этих опытах достигал 14 — 16 млн вольт.

Однако это разрешение проблемы получения сверхвысоких напряжений нельзя было признать удачным. Несмотря на то, что исследователи выбрали специально область, богатую грозами, все же число их не превосходило 30—40 в течение летнего сезона. Необходимость вынужденных простоев в работе, выжидания, „под парами“, т. е. с вполне подготовленной аппаратурой — когда, наконец, соблаговолит разразиться гроза; наконец, серьезные затруднения, связанные с тем, что момент удара напряжения не может быть выбран по произволу исследователя, — все это заставило отказаться от атмосферного электричества, как источника сверхвысокого напряжения, тем более, что ко времени окончания предварительных опытов на горе Женерозо (лето 1929 г.)

техника получения сверхвысоких напряжений лабораторными методами шагнула далеко вперед.



Рис. 34

Четыре основных направления в технике создания сверхвысоких напряжений

К этому времени наметились четыре основных направления в технике создания высоких напряжений, из которых два развились преимущественно под давлением насущных потребностей электротехники, ввиду необходимости испытания элементов изоляции высоковольтных линий и станций и изучения работы этих объектов в связи с перспективами дальнейшего роста рабочего напряжения линий передач. Эти оба направления — получение высокого напряжения технической частоты и электрических ударов, импульсов.

Два других направления — сверхвысокие напряжения высокой частоты и постоянное высокое напряжение — развивались не только электротехниками, но и физиками, разрабатывавшими проблему ядра, которые подчас шли совсем необычными для электротехников путями, в связи с тем, что требования, обязательные для технической испытательной установки (например, довольно значительная мощность), зачастую не играли существенной роли при выборе установки для питания сверхвысоковольтных трубок — источников снарядов для исследования ядра.

Остановимся теперь вкратце на каждом из упомянутых направлений, укажем положенные в основу их принципы и рассмотрим их основные достоинства и недостатки.

Переменное напряжение технической частоты. Трансформаторы с железом

Высокое напряжение технической частоты получают с помощью высоковольтных трансформаторов с железом. Как и у всякого обычного трансформатора, его основными частями являются две обмотки из изолированной проволоки, навитой на ярмо, набранное из листового железа.

Переменный ток от сети пропускается через первичную обмотку, в результате чего в ярме создается переменный магнитный поток. В каждом из витков вторичной обмотки создается при этом электродвижущая сила. Напряжения отдельных витков складываются между собою, так что при достаточно большом числе витков вторичной обмотки мы теоретически можем получить сколь угодно большое напряжение между ее концами.

Основным затруднением при конструировании высоковольтного трансформатора с железом является изоляция вторичной обмотки. Вторичная обмотка должна быть изолирована как от первичной обмотки, так и от ярма и, вместе с тем, не должна быть расположена с очень большим зазором, так как это, во-первых, означало бы увеличение габаритов и веса трансформатора, а во-вторых, при раздутой вторичной обмотке не весь магнитный поток первичной обмотки действовал бы на витки вторичной, а следовательно нельзя было бы на ней получить полного напряжения. Как известно, при небольших напряжениях воздух является почти идеальным изолятором, однако при значительных силах электрического поля в нем происходит ионизация, при чем он полностью утрачивает свои изолирующие свойства, „пробиваясь“ электрической искрой. Ясно, что применять воздух для изоляции вторичной обмотки высоковольтного трансформатора довольно затруднительно.

Трансформаторы с маслом Поэтому в технике высоковольтного трансформаторостроения давно уже стали пользоваться в качестве изоляционного материала минеральным маслом (один из продуктов переработки нефти), известным под названием трансформаторного масла, которым заливается весь трансформатор, помещенный в соответствующий бак. Сухое трансформаторное масло выдерживает не пробивающийся напряжение примерно в 5 раз большее, чем соответствующий слой воздуха; однако трансформаторное масло жадно впитывает в себя из воздуха влагу, теряя при этом свои изоляционные свойства. Поэтому маслonaполненные трансформаторы должны быть наглухо закупорены от доступа внешнего воздуха.

Вывод высоко-го напряжения Это обстоятельство ставит новое затруднение перед конструктором высоковольтного трансформатора. Концы вторичной обмотки, обладая большим напряжением, должны быть проведены через крышку трансформатора, а выводы на напряжение порядка миллиона вольт представляют собой целое сооружение (рис. 35). Обычно один конец вторичной обмотки присоединяют к ярму и корпусу,

а выводят из трансформатора только один конец вторичной обмотки. Проходные изоляторы на миллион вольт настолько громоздки (рис. 36), что по своим размерам они превышают самый трансформатор и представляют самую дорогую его часть.

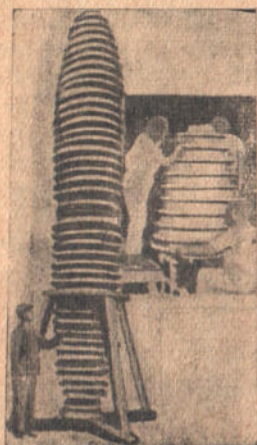


Рис. 35

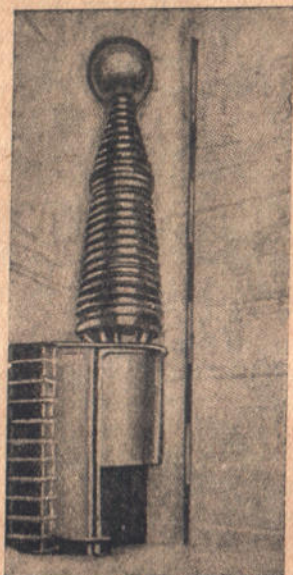


Рис. 36

Каскадное включение трансформатора

В связи с этим в большинстве современных сверхвысоковольтных трансформаторных установок выводы на столь высокие напряжения не строятся; один трансформатор на полное напряжение заменяется группой трансформаторов, включенных каскадом. Принцип каскадного включения можно понять из рис. 37, на котором представлена трансформаторная установка на миллион вольт, принадлежащая Калифорнийскому технологическому институту (САСШ), от которой питается разрядная трубка на 750 000 вольт, построенная в 1928 г. Лауритсенom и Беннеттом. Напряжение в миллион вольт получается с помощью четырех трансформаторов.

Каждый из трансформаторов имеет три обмотки: первичную на 3 000 вольт, вторичную на 250 000 вольт и „третичную“ также на 3 000 вольт. Один из концов вторичной обмотки присоединен к кожуху, другой — к третичной обмотке. Таким образом, при работе трансформатора третичная обмотка, имея между своими зажимами всего 3 000 вольт, вся находится под напряжением в 250 000 вольт относительно земли. Оба конца третичной обмотки выведены через один проходной изолятор и присоединены к первичной обмотке второго трансформатора, который весь установлен на изолирующей колонке и имеет

напряжение 250 000 вольт. Вторичная обмотка этого трансформатора дает еще 250 000 вольт и присоединена к третичной (на 3 000 вольт), концы которой пропущены через проходной изолятор на 250 000 вольт, но имеет относительно земли уже 500 000 вольт (относительно кожуха второго трансформатора 250 000 вольт, да и сам кожух имеет еще 250 000 вольт).

Таким образом, каждый из трансформаторов добавляет по 250 000 вольт, при чем ни на одном из них нет выводов на большее напряжение. Вместо того чтобы изолировать вывод, изолируют от земли кожухи трансформаторов, что оказывается более выгодным, несмотря на то, что каскадная установка занимает значительно больше места, чем один трансформатор на полное напряжение. В частности, описанная установка, на которой проводили свои опыты Лауритсен и Беннетт, занимает большую часть зала размером в $21 \times 46 \times 17$ (высота) метров.

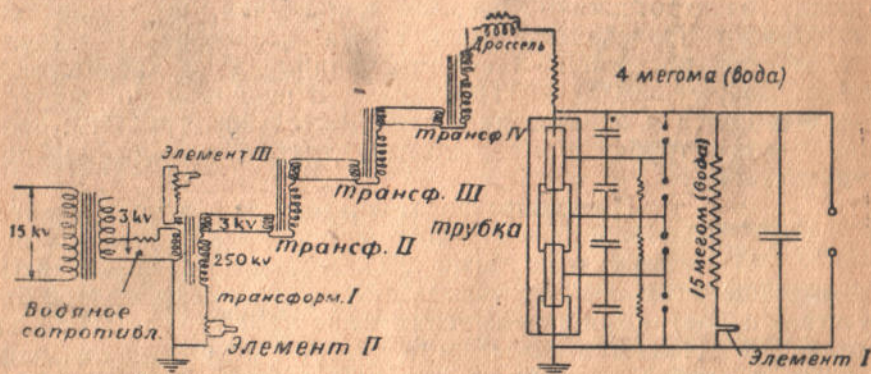


Рис. 37

По такому принципу построены все крупнейшие высоковольтные установки технической частоты. Максимальное напряжение, полученное путем каскадного включения трансформаторов, равно 2 200 000 вольт; соответствующая установка, состоящая из 7 каскадно включенных трансформаторов, принадлежит Станфордскому университету (САСШ).

Основным назначением подобных установок является исследование различных элементов изоляции технических высоковольтных устройств. При этих испытаниях требуется довольно значительная мощность. Американцы, например, предъявляют довольно высокие требования к мощности испытательных трансформаторных установок, считая необходимым увеличивать мощность установки с увеличением ее напряжения, придерживаясь правила „киловатт на киловольт“. Согласно этому правилу, описанная установка на миллион вольт (1 000 киловольт) обладает мощностью в 1 000 киловатт. Разумеется, такие огром-

ные мощности совсем не нужны для работы с разрядными трубками, и если кое-где такого рода установки и используются для питания трубок, то только потому, что сверхвысоковольтные каскадные установки очень громоздки и дороги и заводить их специально для питания трубок нерационально, так что нередко для этих работ пользуются уже имеющимися мощными электротехническими испытательными установками, употребляя при этом обычно лишь ничтожную часть их мощности.

Это непосредственно применимо к работам Лауритсена и Беннетта, которым удалось построить трубку на 750 000 вольт, т. е. переступить за предел, ограничивавший в течение многих лет напряжение, которое удавалось подвести к пустотному прибору. В ряде развившихся за последние годы отраслей производства пустотных приборов, обслуживающих радиотехнику, рентгенотехнику и некоторые отрасли электротехники высоких напряжений, на основании длительного производственного опыта вырисовалась затруднительность постройки пустотных приборов на напряжения, превышающие 200 000 — 250 000 вольт. В основном эти затруднения сводятся к образованию самостоятельного разряда, пробую стенок трубки и к перекрытию трубки по внешней поверхности.

Преждевременный разряд

Неоднократно замечалось, что в чрезвычайно хорошо выкачанном приборе, в котором при напряжениях ниже 200 000 вольт не наблюдается ни малейшего разряда (что указывает практически на полное отсутствие ионов) — при напряжениях выше 200 000 — 250 000 вольт мгновенно начинается разряд, при котором разогреваются введенные в прибор электроды и стекло, выделяются большие количества газов, — словом, быстро нарушается разрежение, которое необходимо для того, чтобы пустотный прибор мог работать. В настоящее время причина этого явления более или менее установлена; она носит название „холодного испускания электронов из металла“.

Вероятно, большинству читателей известны принципы катодной лампы, раскаленный катод которой (проволочка из тугоплавкого металла) испаряет электроны, благодаря чему пустотная лампа делается проводником тока, когда ее катод имеет знак минус (электроны отталкиваются от катода к аноду), и запирает ток, когда катод заряжен положительно. Вся техника пустотных приборов основана на этом явлении испускания электронов раскаленными металлами или „горячем испускании“ (эффект Ричардсона).

Оказывается, однако, что, создавая значительное поле у поверхности металла и притом в таком направлении, что эта поверхность заряжена отрицательно, — можно при некотором значении поля (около одного - двух миллионов вольт на санти-

метр) добиться того, что электроны начнут вырываться из холодного металла (эффект Шоттки).

То, что техника пустотных приборов никак не могла перешагнуть через роковую цифру 200 000 — 250 000 вольт, подведенных к трубке, по видимому непосредственно связано с явлением холодного испускания. Около катода трубки при приложении к ней напряжения создается громадное поле, которое начинает вырывать электроны из металла, а они, ускоряясь в трубке, падают с накопленной во время полета энергией на стенки и анод, разогревают их до значительной температуры, выбивают из них довольно большие количества газа, который распространяется по всей трубке и в дальнейшем под ударами новых порций электронов является источником ионов. Таким образом, в трубке разыгрывается бурный разряд, из-за которого в случае небольшой мощности, подведенной к трубке, приложенное к ней напряжение мгновенно падает (или при достаточной мощности весь прибор разрушается под действием громадного разогрева).

Таким образом первопричиной появления разряда в пустотной трубке является (при достаточно хорошей откачке) вырывание электронов из катода, которое в свою очередь обусловлено образованием очень сильного поля около этого электрода. В связи с этим, на первый взгляд, задача повышения напряжения, подведенного к трубке, кажется довольно безнадежной, однако это неверно.

В самом деле, мы уже говорили о том, что холодное испускание начинается лишь тогда, когда напряжение поля (падение потенциала на сантиметр) достигает у катода примерно одного-двух миллионов вольт на сантиметр.

Однако конструктора разрядных трубок стремятся довести разность потенциалов на концах трубки до нескольких миллионов вольт, и для них вовсе не важно сконцентрировать все падение потенциала у самого катода; напротив, с разрядом, причиной которого является холодное испускание, именно борются тем, что принудительно создают равномерное распределение потенциала вдоль трубки. Для этой цели нередко разделяют трубку на ряд сообщающихся камер, при чем на каждую из них прикладывают одинаковую часть полной разности потенциалов, приложенной к трубке. Принудительное распределение потенциала, которое, как мы увидим, достигается у различных исследователей по-разному, — очень важная уловка, к которой прибегают конструкторы сверхвысоковольтных разрядных трубок. Одной из основных мер борьбы с преждевременным разрядом является тщательное удаление газа из электродов и стенок (обезгаживание), которое достигается предварительным прогревом всей трубки при интенсивной откачке, а затем „тренировкой“, т. е. периодическим пропуском разряда через трубку, в результате которого из электродов и стенок

выбиваются (и откачиваются) остатки заключенного в них газа. При соблюдении всех этих условий (принудительное распределение потенциала, обезгаживание) к трубке можно подвести напряжение, значительно превышающее 200 000 — 250 000 вольт, однако при этом обычно стенка трубки в каком-нибудь месте обязательно пробивается электрической искрой, через образовавшееся отверстие в трубку врывается воздух, и, таким образом, в конечном счете трубка оказывается непригодной.

Пробой стенок
разрядных
трубок

Пробой стенки трубки является вторым чрезвычайно серьезным препятствием на пути строителя сверхвысоковольтной трубки. На первый взгляд этот пробой представляет довольно загадочное явление. В самом деле, мы привыкли наблюдать пробой

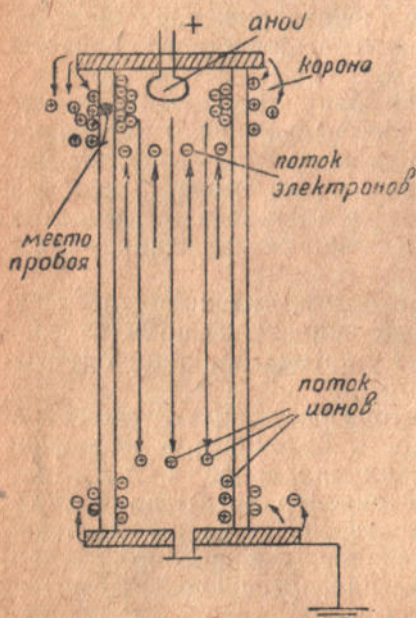


Рис 38

изолятора в тех случаях, когда он находится между двумя проводящими (например, металлическими) предметами, к которым приложена достаточная разность потенциалов. Стенка же пустотной трубки граничит, с одной стороны, с воздухом (изолятор), с другой — откаченным пространством внутри трубки (как говорят — с вакуумом). И та и другая среда — изоляторы.

Почему же стенки трубки неизменно пробиваются, когда к ней подведено достаточно высокое напряжение? Причина этого явления заключается в том, что при работе разрядной трубки в ней летает громадное количество электронов и ионов. Часть из них не долетает до соответствующего электрода и прилипает к стенке, которая,

являясь довольно приличным изолятором, сохраняет в течение длительного времени образовавшийся на ней заряд (рис. 38).

Так как электроны внутри трубки летят к аноду, а положительные ионы — к катоду, то сильнее всего заряжаются положительно стенки трубки около катода, а отрицательно — около анода. Между электродом и близлежащей частью внутренней поверхности трубки может получиться значительная разность потенциала; а следовательно в воздухе около электрода получится большое поле, появится корона, т. е. ионизация воздуха; положительные ионы из воздуха начнут прилипать к той части

внешней стенки трубки, где на противоположной (внутренней) стороне стенки налип отрицательный заряд; обратная картина получится против мест скопления положительного заряда на внутренней стенке, и, таким образом, в некоторых точках стенки окажутся приложенными громадные разности потенциалов, в результате чего стенка в какой-нибудь точке пробьется.

Первопричиной этого неприятного свойства разрядных трубок является попадание заряженных частиц на внутренние стенки трубки и образование короны и поверхностного разряда по внешней стенке. Для борьбы с ними пытаются предотвратить попадание заряженных частиц на внутреннюю стенку трубки, строя их так, чтобы частицы на пути к стенке непременно встретили металлическую преграду, а кроме того, особенно за последние годы, переходят к толстостенным трубкам, стенки которых способны выдержать возможно большие напряжения.

Немаловажным препятствием для строителей высоковольтных разрядных трубок является также образование разряда по внешней стороне трубки. Мы уже говорили о той опасности для стенки трубки, которую представляет прилипание ионов из воздуха к внешней ее стороне; однако, кроме этой опасности, которую отчасти удается предотвратить, не допуская образования заряда на внутренней стенке,—большую неприятность представляет разряд извне между электродами, который также мешает приложить к трубке очень высокое напряжение. Затруднить образование этого разряда удастся, закругляя электроды трубки, увеличивая ее длину, задавая вдоль нее принудительно равномерное распределение потенциала и, в некоторых случаях, погружая всю трубку в трансформаторное масло—среду, значительно превосходящую воздух по своей электрической прочности.

Таким образом, препятствия, стоящие перед конструктором высоковольтной разрядной трубки, не являются непреодолимыми. Правда, для того чтобы разработать рецепты против трех основных „бичей“ высоковольтных трубок, рецепты, описание которых заняло не более двух страниц в этой книжке, потребовались многие годы работы ряда передовых лабораторий; но сейчас этот этап уже пройден, трудности в принципе разрешены и на опыте показано, что высоковольтные трубки на напряжения, превышающие миллион вольт, строить можно. Конечно, при построении каждой новой трубки приходится встречаться с новыми мелкими трудностями, с которыми мы еще познакомимся в дальнейшем. Эти трудности отпугивают некоторых экспериментаторов от построения высоковольтных разрядных трубок, в результате чего, например, явилась изящнейшая трубка Лауренса, представляющая обход „узкого места“, заключающегося в необходимости введения в вакуум напряжений порядка миллиона вольт (конструкции этой трубки

мы коснемся в конце этой главы); но все же целый ряд экспериментаторов в десятках лабораторий Америки, Европы и СССР работает над осуществлением новых типов сверхвысоковольтных трубок и улучшением существующих, в результате чего число удачных конструкций все увеличивается, напряжение, подведенное к трубкам, быстро растет, и уже настал тот час, когда экспериментаторы, вооруженные мощными ионными пушками, направили ураганный огонь подхлестнутых миллионами вольт ионов по оставшимся неразрушенными ядрам.

Познакомившись с основными принципами построения сверхвысоковольтных разрядных трубок, мы можем теперь перейти к описанию основных их типов и в первую очередь к трубке Лауритсена-Беннетта, которая описана на питание переменным током технической частоты от описанной нами четырехтрансформаторной каскадной установки.

Общий вид трубки показан на схематическом рис. 39. Вся трубка крепится на башне из реек высотой около 4 м. Основанием ее служит стальная плита размером 70×70 см и толщиной около 12 мм, которая укреплена на платформе деревянной башни. В этой плите проделано круглое отверстие диаметром около 40 см, в которое вставлено дно трубки в форме диска с водяным охлаждением и впаяны две широкие трубы, идущие через ловушку, охлаждаемую жидким воздухом, в которой задерживаются ртутные пары,—к мощному диффузионному ртутному насосу. Кроме того, на этом же диске установлен один из электродов трубки, также снабженный водяным охлаждением.

Самая трубка состоит из четырех толстостенных (около 8 мм) стеклянных цилиндров диаметром в 30 см, длиной в 70 м. Края цилиндров вставлены на специальной замазке в желобки, выточенные в стальных кольцах, которые проходят внутрь трубки и на которых укреплены цилиндрические защитные стальные трубы, входящие друг в друга (диаметры соответственно 18 и 28 см), снабженные по концам кольцевидными закруглениями для устранения острых краев, у которых может начаться преждевременный разряд.

Назначение этих цилиндрических экранов—предотвратить попадание электронов или ионов на внутренние стенки трубки. Действительно, из рисунка нетрудно убедиться, что ни одна частица, двигаясь прямолинейно, не сможет попасть на стеклянную стенку, чем полностью предотвращается возможность ее пробоя. Верхний электрод состоит из идущей вдоль всей трубки стальной трубы диаметром в 7,5 см, заканчивающейся в 10 см от нижнего электрода. Вдоль всей трубки-электрода для охлаждения циркулирует вода. К стальным дискам, через которые соединены отдельные стеклянные цилиндры извне трубки, прикреплены „бублики“ из листового металла, которые умень-

шают возле них поле и затрудняют образование короны и перекрытия трубки по ее внешней стенке.

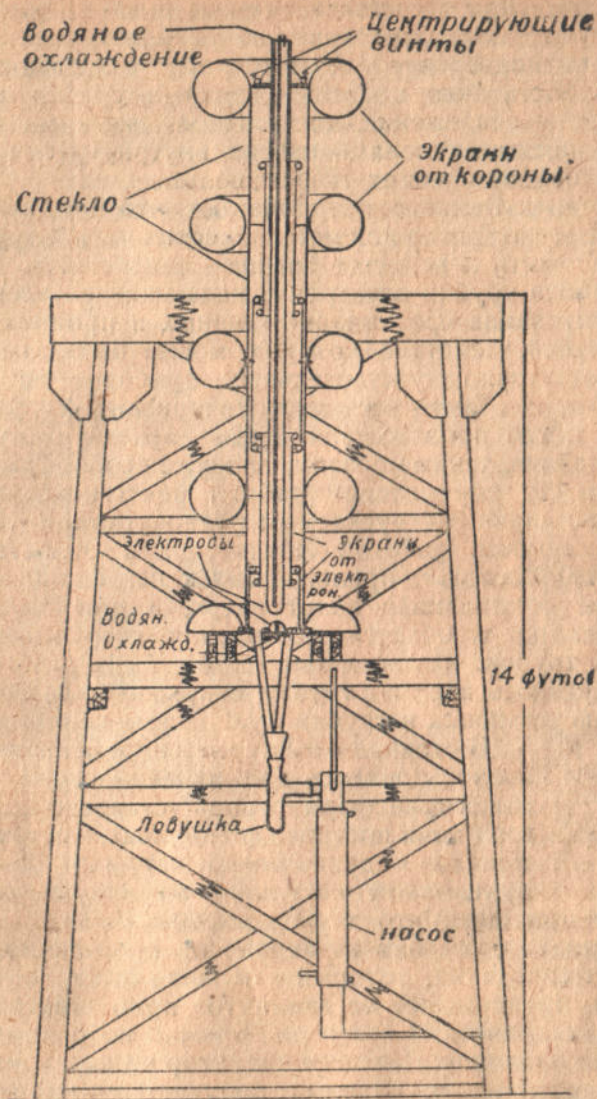


Рис. 39

Вдоль трубки искусственно поддерживается равномерное распределение потенциала с помощью приключенной между „бубликами“ системы емкостей, сопротивлений и разрядников (рис. 38).

Испытание этой трубки дало следующие результаты: к трубке удалось подвести напряжение до 750 000 вольт, несмотря на то, что ее металлические части и стеклянные стенки не представлялось возможным обезгазить, так как ни электроды, ни экраны, ни стеклянные цилиндры при данной конструкции трубки не могли быть подвергнуты достаточному нагреванию. Однако, пользуясь достаточно мощным насосом, в трубке можно было поддерживать разрежение, достаточное для того, чтобы предотвратить преждевременный разряд внутри трубки при напряжениях, не превышающих 750 000 вольт.

Лауритсен и Беннетт предполагают, что при выборе более подходящего материала для металлических частей трубки можно будет приложить к ней еще большее напряжение.

При работе трубки электроны, падающие на электроды, вызывают испускание чрезвычайно мощных и проникающих рентгеновых лучей, действие которых может быть замечено с помощью достаточно чувствительных приборов на расстоянии свыше 100 м. Эти лучи вызывают почернение фотографических пластинок после прохождения через двухсантиметровый слой свинца, оставляя, таким образом, далеко за собой самые жесткие полученные до описываемой работы рентгеновы лучи и приближаясь к γ -лучам, испускаемым радиоактивными веществами.

Таким образом, работой Лауритсена и Беннетта роковой предел в 250 000 вольт, приложенных к разрядной трубке, был сдвинут на полмиллиона вольт вверх, и ими был поставлен первый рекорд в области построения сверхвысоковольтных разрядных трубок. Дальнейшим шагом была работа Кулиджа, которому удалось ввести в трубку напряжение до 900 000 вольт. К описанию установки и трубки Кулиджа мы сейчас и перейдем.

В отличие от Лауритсена и Беннетта, которые воспользовались для питания своей трубки готовой трансформаторной установкой, Кулидж для этой цели построил специальный источник напряжения — индукционную катушку. Действие индукционной катушки или индуктора основано на том же принципе, что и у трансформатора. Индуктор, как и трансформатор, состоит из первичной и вторичной обмотки, навитых на сердечник, который в отличие от сердечника трансформатора, представляет не замкнутое ярмо шихтованого железа, а цилиндрический стержень, обычно набранный также из пластин или проволок. Питается индуктор не переменным током, а током прерывистым, который получается при пропускании постоянного или переменного тока через прерыватель. Конструкции прерывателей бывают весьма различны: от молоточкового, подобного по устройству электрическому звонку (для маленьких катушек), до мощных турбинных прерывателей, могущих питать индукторы мощностью в несколько киловатт. Индукторы, питающиеся от прерывателей, во вторичной обмотке

Индукционная катушка, как источник напряжения для трубки

дают толчки напряжения, при чем мощность индукторов в основном, благодаря тому, что эти толчки происходят реже, чем колебания переменного тока, значительно ниже, чем у трансформаторов технической частоты. Но, как мы видели, обычно разрядные трубки и не потребляют значительной мощности, так что индукторы являются достаточно удобными источниками напряжения для их питания.

Обычно индукционные катушки строятся на напряжения, не превышающие 300 000 вольт. Кулиджем и его сотрудниками был разработан новый тип индуктора, который при относительно невысокой сто-

Индуктор на
900 000 вольт

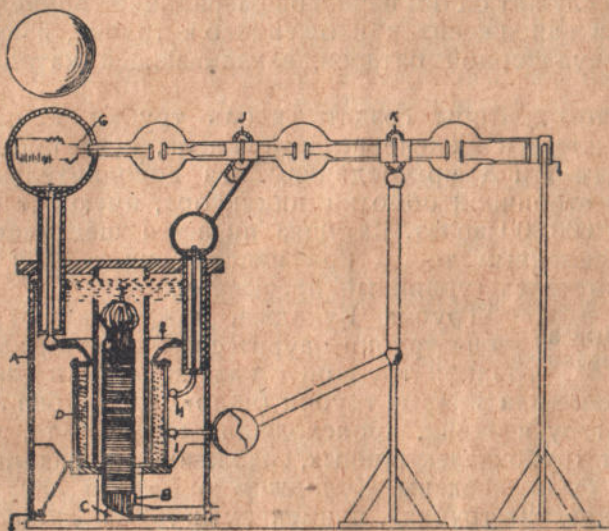


Рис. 40

имости оказался вполне удовлетворительным, так как давал напряжение до 900 000 вольт. Его схема приведена на рис. 40.

В отличие от обычных индукторов, в индукторе Кулиджа применена не твердая изоляция вторичной обмотки, а трансформаторное масло.

Бак *A* представляет собой цилиндр из герколита (материал, изготавливаемый путем горячей прессовки многослойной бумаги, пропитанной бакелитовым лаком; аналогичные материалы изготавливаются и в Союзе под названием изолит, гетит и др.). Первичная обмотка *B* намотана на изолирующей трубке, внутри которой находится сердечник *C*. Вторичная обмотка *D* состоит из плоских секций, отделенных друг от друга бумажными прослойками. Нижний конец вторичной обмотки заземлен, так что разность потенциалов между первичной и вторичной обмотками растет к верхнему концу индуктора. Пробой масла, которым

заполнен цилиндр, начался бы между верхними концами обмоток при напряжении в 600 000 вольт, если бы не было алюминиевого раструба *E*, который выравнивает поле у конца вторичной обмотки и предохраняет от разряда при напряжениях до 800 000 вольт. При этом напряжении произошел бы пробой между алюминиевым экраном и верхним концом сердечника, если бы последний не был снабжен шаровым экраном *F*, который позволяет поднять напряжение на вторичной обмотке до 900 000 вольт. Конец вторичной обмотки выведен через проходной изолятор, наполненный маслом, и присоединен к полюму металлическому шару *G* диаметром около 50 см, который одновременно служит одним из шаров разрядника, применяемого для измерения напряжения, приложенного к трубке, и вместилищем для аккумуляторной батареи, накаливающей катод разрядной трубки.

Для того, чтобы создать вдоль трубки принудительное равномерное распределение потенциала, к ее промежуточным электродам *I* и *K* присоединены два дополнительных вывода *H* и *I* от вторичной обмотки индуктора, имеющие потенциалы 300 000 и 600 000 вольт. Катушка питается шестидесятипериодным¹ переменным током при напряжении в 1200 вольт, пропущенным через турбинный прерыватель.

Трубка Кулиджа, в отличие от описанной Электронные и ионные трубки выше трубки Лауритсена-Беннета, является разрядной трубкой с калящимся или горячим катодом. Газовые или ионные трубки (например, трубка Лауритсена) по характеру явлений, происходящих при работе, резко отличаются от трубок электронных, снабженных горячими катодами, которые были введены Кулиджем около 15 лет тому назад в рентгеновских трубках, применяемых для медицинских целей, а также для исследования металлов.

В то время, как в ионных трубках газ разрежен до давления примерно в одну тысячную миллиметра — в трубках Кулиджа стремятся всеми доступными способами добиться совершенной пустоты (или, как говорят, наилучшего вакуума), при чем давление ничтожных остатков газа в них не превышает одной миллионной миллиметра (газ разрежен примерно в миллиард раз).

Процесс разряда в газовых (ионных) трубках разыгрывается следующим образом: мы уже говорили, что при приложении к ионной трубке высокого напряжения у ее катода устанавливается сильное электрическое поле. Попав в это поле, те немногие положительные ионы, которые в ничтожном количестве всегда находятся в любом газе, подхватываются полем и, если только оно достаточно сильно, то, падая на поверхность катода, выбивают из него большое количество электронов. Элек-

¹ В Америке промышленный и осветительный ток обладает частотой не в 50 пер/сек., как у нас в Союзе и в большинстве стран Европы, а в 60 пер/сек.

троны имеют отрицательный заряд, и, следовательно, тянутся полем в противоположную сторону, двигаясь с громадной скоростью к аноду. На своем пути, изредка ударяясь о молекулы газа, они расщепляют их на ионы, при чем „новые“ положительные ионы подхватываются полем и несутся положительные — к катоду, отрицательные — к аноду.

Таким образом, как мы видим, в разряде в ионных трубках выдающуюся роль играет заполняющий трубку разреженный газ, ибо образованные в нем ионы являются причиной электронного испускания с катода. Разумеется, при работе ионной трубки давление газа внутри нее не должно быть сколько-нибудь значительным, так как в противном случае ни электроны, ни ионы, как было сказано выше, не смогут получить в поле нужной для ионизации скорости, в виду того, что они будут расходовать свою энергию на слишком частые столкновения с атомами или молекулами газа.

В электронных трубках, введенных в практику Кулиджем, остатки газа, находящиеся в трубке, играют только вредную роль. В этой трубке при ее нормальной работе должны двигаться только одни электроны. Источником электронов служит калящийся катод в виде проволочки или ленты из весьма тугоплавкого металла, который накаливается от вспомогательного источника тока до температуры, при которой происходит достаточно интенсивное испарение электронов из металла. Электроны, испаренные катодом, ускоряются электрическим полем внутри трубки и могут быть использованы у анода трубки. Пропустив их через окошко, прикрытое тонкой фольгой из алюминия или листочком слюды, мы получаем поток чрезвычайно быстрых электронов, т. е. „искусственные β -лучи“. Падая на массивный анод, электроны излучают часть своей энергии в виде крайне жестких рентгеновых лучей.

Электронные трубки выгодно отличаются от ионных значительно большей устойчивостью в работе и отсутствием необходимости тщательного регулирования давления газа в трубке.

Трубка на 900 000 вольт состоит из трех двугорловых шаров, соединенных металлическими перемычками. Эти перемычки в форме длинных цилиндров с закругленными краями (рис. 40) входят глубоко внутрь шаров и почти полностью предотвращают попадание электронов на внутреннюю поверхность стеклянной стенки. На каждую из секций трубки падает вполне определенное напряжение, так как к ним присоединены три секции индуктора.

Электроны, испущенные калящимся катодом, питающимся аккумуляторной батареей, спрятанной внутри шара G, в первой секции ускоряются до 300 000 вольт, затем, пройдя металлическое горло, попадают во вторую, где их скорость доводится до 600 000 вольт и, наконец, пролетают в третью, где они до-

Трубка Кулиджа на 900 000 вольт

Трубка на 900 000 вольт состоит из трех двугорловых шаров, соединенных металлическими перемычками. Эти перемычки в форме длинных цилиндров с закругленными краями (рис. 40) входят глубоко внутрь шаров и почти полностью предотвращают попадание электронов на внутреннюю поверхность стеклянной стенки.

стигают своей полной скорости 900 000 вольт, после чего поступают в охлаждаемый проточной водой анод, имеющий тоже форму цилиндра с закругленными краями, в дне которого предусмотрено окошко для выпуска электронов наружу, прикрытое тонкой алюминиевой фольгой.

Некоторые действия электронов в 900 000 вольт

Сколько известно, трубка Кулиджа (рис. 41) еще не была использована, как орудие для изучения ядер. Вероятно, наибольших результатов можно ожидать от их бомбардировки не электронами, а ионами, в частности положительными ядрами водорода (протонами), так что для опытов по ядру трубка Кулиджа должна быть дополнена источником ионов.

Однако и с быстрыми электронами Кулиджем был проделан целый ряд опытов, давших чрезвычайно интересные результаты. Так как их направление не относится непосредственно к теме нашей книжки, мы не сможем остановиться на них подробно и ограничимся лишь кратким перечнем.

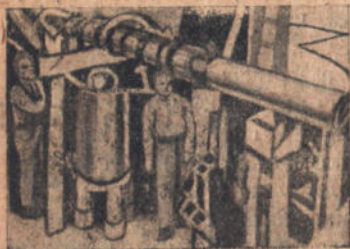


Рис. 41

Выходя из окошка в воздух, эти электроны вызывают интенсивнейшую ионизацию, сопровождаемую свечением воздуха (рис. 42). Целый ряд кристаллов, подвергнутых действию электронной бомбардировки, испускает свечение как во время бомбардировки, так и после нее.

Электронная бомбардировка вызывает и облегчает многие химические реакции, как то: образование озона из кислорода воздуха, перекиси водорода [из смеси кислорода с водяным паром и т. д., облегчает „высыхание“ различных растительных масел, как льняного и тутового, вызывает образование витамина D во многих препаратах, подвергнутых ее действию.

На-ряду с этим быстрые электроны оказывают чрезвычайно интересное биологическое действие, умерщвляя животные и растительные ткани, вызывая появление медленно заживающих язв на коже, и в то же время обладают лечебными свойствами в случаях злокачественных кожных болезней, как рак и туберкулез кожи, хроническая экзема и т. д.

Быстрые электроны оказываются безусловно смертельными для бактерий. Колонии всевозможных, наиболее стойких бактерий были подвергнуты на несколько секунд электронной бомбардировке, в результате которой бактерии были поголовно истреблены.

Свечение под действием электронной бомбардировки, наблюдаемое в кристаллах, в сильнейшей степени зависит от их состава, являясь чувствительным к малейшим примесям. Поэтому это свечение может быть использовано для распознавания поддель-

ных драгоценных камней и т. д. Несмотря на ряд применений катодных лучей, Кулидж считает однако основной областью применения своей трубки физику ядра.

Одним из наиболее старых методов

получения очень высоких напряжений является трансформатор Тесла. Длинные и мощные искры, которые можно извлечь из вторичной обмотки этого трансформатора, служили эффектной демонстрацией резонанса электрических колебаний задолго до того, как электротехникам удалось построить трансформаторы с железом на напряжения в миллион и больше вольт. Преимуществом трансформатора Тесла, которое заставило ряд исследователей завязаться его применением к проблеме исследования атомного ядра, являются сравнительно небольшие мощности, которые требуются для получения высоких напряжений по этому методу. В сущности, трансформатор Тесла представляет собой не что иное, как два электрических колебательных контура, в одном из которых (контур первичной обмотки) возбуждаются колебания, в свою очередь вызывающие появление колебаний в контуре вторичной обмотки.

Схема трансформатора Тесла приведена на рис. 43. Первичный его контур состоит из емкости, самоиндукции и разрядника, включенных последовательно. Питаящая установка, обычно состоящая из вторичной обмотки высоковольтного трансформатора с железом и пустотного выпрямителя (кенотрона), пропускающего ток только в одну сторону, через блокировочное сопротивление заряжает емкость первичного контура до такого напряжения, при котором в разряднике происходит разряд. Тогда конденсатор, оказавшийся замкнутым, через искру на самоиндукцию начинает разряжаться до тех пор, пока напряжение на его обкладках не станет равным нулю (благодаря блокировочному сопротивлению, питающая установка не успевает за время разряда подвести сколько-нибудь значительный заряд на обкладки конденсатора, так что для простоты можно



Рис. 42

считать, что в момент разряда она как бы совсем отключена от колебательного контура).

Однако в момент полной разрядки конденсатора ток в первичном контуре не прекращается, так как в самоиндукции возникла электродвижущая сила, которая продолжает поддерживать ток, перезаряжающий конденсатор. Когда конденсатор заряжен, ток спадает, электродвижущая сила самоиндукции становится равной нулю, но зато конденсатор вновь начинает разряжаться, и весь процесс повторяется сызнова.

Таким образом в первичном контуре возникают электрические колебания.

Вследствие сопротивления проводников, потерь в конденсаторе, а главное — потерь в разряднике, эти колебания — затухающие, т. е. после каждого колебания напряжение, до которого заряжается конденсатор, становится все меньше и меньше. Число колебаний в секунду или, как говорят, частота контура зависит

от величины емкости и самоиндукции. Чем больше емкость и самоиндукция, тем медленнее будет происходить перезарядка, тем меньше частота колебаний. Меняя емкость или самоиндукцию, можно менять эту частоту или, как говорят, настраивать контур.

Вторичная обмотка трансформатора Tesla, состоящая из большого числа

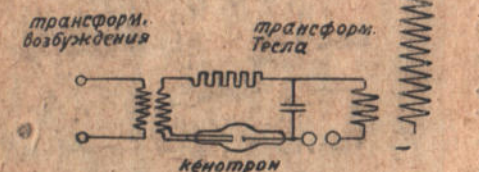


Рис. 43

витков, присоединена одним концом к земле. Другой ее конец, который нередко снабжается шаром для измерения напряжения по длине искры, а также для уменьшения короны, имеет некоторую емкость. Таким образом, составляет второй колебательный контур, который обладает собственной частотой колебаний.

Подстраивая частоту первичного контура к частоте вторичного, можно добиться того, что на вторичной обмотке трансформатора Tesla получатся колебания напряжения, приблизительно во столько раз превышающие колебания в первичном контуре, во сколько раз число витков вторичной обмотки больше чем у первичной.

В отличие от технических трансформаторов с железом при этом вовсе не требуется, чтобы весь магнитный поток первичной обмотки проходил во вторичную; связь между обоими контурами не должна быть особенно большой, так как здесь используется резонанс, при котором небольшое раскачивание (действие первичного контура на вторичный) может вызвать колебания с громадным размахом (амплитудой).

Основное затруднение, с которым приходится сталкиваться при попытке получить на трансформаторе Тесла напряжения около миллиона вольт и выше, заключается в появлении короны около

высоковольтного конца вторичной обмотки, из-за которой та небольшая энергия, которая перекачивается во вторичную обмотку из первичной, в основном затрачивается на утечки через ионизованный воздух.

Поэтому техническим трансформаторам Тесла, которые довольно распространены на высоковольтных полях заводских лабораторий и испытательных станций электроизоляционных промышленных предприятий, придаются огромные размеры (чтобы по возможности удалить от земли и первичной обмотки высоковольтную часть вторичной), и они снабжаются специальными экранами, предохраняющими от появления короны. При этом трансформаторы Тесла становятся необычайно громоздкими. Представление об их размерах и конструктивном выполнении можно получить по рис. 44, на котором представлен трансформатор Тесла на миллион двести тысяч вольт, изготовленный фирмой Сименс в Германии (для масштаба можно указать, что диаметр шаров в разряднике равен 75 см, а длина вторичной катушки без экрана немного более 3 м).

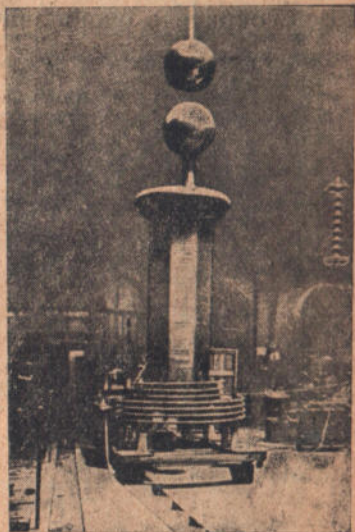


Рис. 44

Естественно было бы для уменьшения габарита трансформатора поместить его в масло, в котором корона начинается при значительно больших напряжениях, однако для технических трансформаторов это решение не выдерживает критики. В самом деле, для электротехнических испытаний недостаточно получить высокое напряжение внутри бака, нужно его оттуда вывести, и в этом и заключается все затруднение. Построить вывод на миллион вольт высокой частоты — задача практически не разрешенная.

Однако группа американских исследователей — Трансформатор Брейта, Брейт, Тьюв, Дэль и Хэвстед, — задавшихся целью использовать трансформатор Тесла для ускорения частиц, предназначенных для бомбардировки атомных ядер, решила воспользоваться преимуществами, которыми обладает хорошее трансформаторное масло по сравнению с воздухом, и погрузить свой трансформатор в тщательно очищенное и высушенное трансформаторное масло. Их задача облегчалась тем, что

отпадала необходимость в выводе огромного напряжения из бака; так как сама разрядная трубка могла быть помещена внутри его; однако, прежде чем пытаться приложить напряжение к разрядной трубке, американские исследователи решили выяснить вопрос о том, какое максимальное напряжение может быть получено с помощью трансформатора Тесла, при условии, что последний погружен в масло.

Схема установки, на которой испытывался трансформатор, приведена на рис. 45, а самый трансформатор — на рис. 46. Благодаря погружению трансформатора в масло, его размеры удалось сократить очень значительно. Диаметр вторичной обмотки

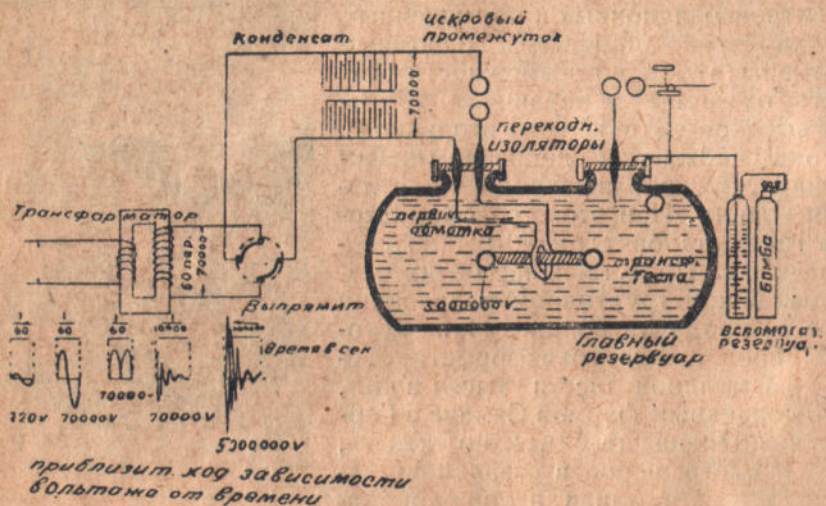


Рис. 45

был равен восьми сантиметрам, длина всего около одного метра; обмотка состояла из 5 000—7 000 витков медной проволоки с двойной шелковой изоляцией или эмалированной. На концах обмотки для предотвращения короны закреплялись полые металлические шары.

Трансформатор был помещен в бак с маслом, снабженный двумя съёмными крышками, из которых одна служила для ввода напряжения на первичную обмотку; через вторую был пропущен провод, снабженный на концах шарами для определения напряжения на вторичной обмотке, и труба, соединяющая бак с резервуаром, из которого могло подаваться масло под давлением. Так как электрическая прочность трансформаторного масла увеличивается с давлением, Брейт, Тув и Дэль часть своих измерений производили в масле при повышенном давлении, которое могло быть доведено до 30 атм.

Первичная обмотка питалась от высоковольтного трансформатора на 70 000 вольт через механический выпрямитель.

Опыты увенчались значительным успехом. На трансформаторе, который нельзя не назвать миниатюрным по сравнению с гигантским трансформатором Тесла с воздушной изоляцией, применяемым электротехниками (рис. 44), в масле при давлении в 1 атм. было получено напряжение до 3 200 000 вольт, а при давлении в 30 атм. — 5 000 000 вольт.

Таким образом, первая часть задачи — построение источника напряжения — была в данном случае разрешена чрезвычайно удачно. Если бы только удалось сообщить соответствующую скорость ионам в разрядной трубке, то даже учитывая то, что трансформатор Тесла дает напряжение не все время, а только толчками, в момент проскакивания искры в первичном контуре, Брейт, Тью и Дэль имели бы ионную пушку, которая по интенсивности бомбардировки была бы равносильна 2,5 кг радия.

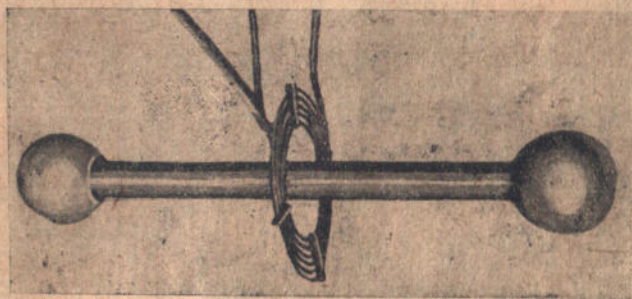


Рис. 46

Трубка Брейта Однако при осуществлении трубки исследователи натолкнулись на серьезные затруднения.

Как мы видели, Кулидж разрешил вопрос о введении в вакуум напряжения до 900 000 вольт путем каскадного соединения отдельных трубок; так же подошли к этому вопросу и Тью, Брейт и Хэвстед. В основном конструкция их трубки ясна из рис. 47. Типичным для нее является подразделение трубки на секции. В отличие от Кулиджа, который создавал принудительное равномерное распределение потенциала вдоль трубки, прикладывая к ее секциям напряжение от отдельных секций индуктора, Брейт, Тью и Хэвстед, подобно Лауритсену и Беннетту, включили параллельно трубке сопротивление, от соответствующих точек которого брался потенциал на секции трубки. Этот делитель напряжений представлял собой трубку, наполненную слабым раствором соли, которая также изображена на рис. 47. На рисунке представлена трубка из шести секций; на некоторых трубках число секций доводилось до пятнадцати.

Внутренние электроды трубки состояли из цилиндрических медных труб с закругленными краями. Так как отдельные секции соединялись между собой легкоплавкой вакуумной замазкой, трубка не могла быть целиком прогрета при обезгаживании, хотя каждый электрод в отдельности предварительно подвергался под откачкой нагреванию до 950 градусов Цельсия.

На рис. 47 изображены также два экрана, один кольцевой, другой — колпачковый. Как оказалось, такие экраны совершенно необходимо надевать на трубку; кольцевые — на ее среднюю часть — по кольцу на каждую секцию, а колпачковые — на концы, во избежание пробоя стеклянной стенки трубки. На первый взгляд может показаться, что, пользуясь принципом Кулиджа, в вакуум можно ввести какой угодно потенциал. В опытах с трансформатором Тесла это совершенно не оправдалось. К труб-

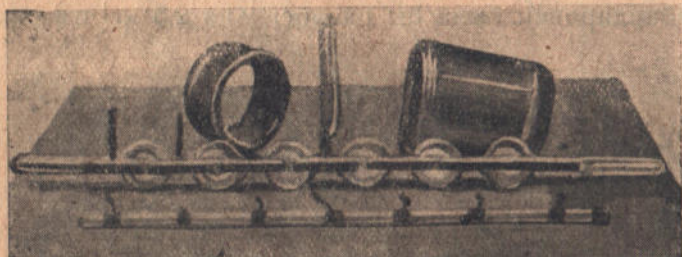


Рис. 47

ке в шесть секций удалось приложить только 850 000 вольт, а к трубке с пятнадцатью секциями не свыше 1 400 000 вольт.

По каким причинам в трубке не удалось устранить разряд, возникавший при этих напряжениях и не позволявший повышать напряжение дальше, — осталось непонятным. Во всяком случае можно сказать, что при столь высоких потенциалах управлять разрядом чрезвычайно трудно. Работы в этом направлении ведутся, хотя, даже в случае благополучного разрешения отмеченной трудности, при питании трубки от трансформатора Тесла можно предвидеть новые затруднения, связанные с тем, что направление поля в трубке все время меняется, так что из ее окошка будут вылетать то ионы, то электроны, что сильно усложнит производство опытов по разрушению ядер.

Все же благодаря несложности высоковольтной аппаратуры, питающей трубку, трансформаторы Тесла до последнего времени представлялись одним из наиболее обещающих методов ускорения ионов в ионных пушках.¹

¹ В СССР помимо ядерной бригады Украинского физико-технического института, работам которой будет посвящена последняя глава настоящей книги, применением трансформатора Тесла для исследования атомного ядра занимается также группа работников Сибирского физико-технического института в Томске.

Импульсные
генераторы

Однако после того, как в электротехнике получил широкое распространение новый источник сверхвысоких напряжений — импульсный, или ударный, генератор, на очередь стала проблема о питании разрядных трубок от этого источника. Импульсные, или ударные, генераторы, которые были известны электротехникам уже довольно давно, только за последние пять-шесть лет стали применяться для получения напряжений, превышающих миллион вольт; вместе с тем именно с помощью импульсного генератора в 1932 г. был получен рекордный удар напряжения в 10 миллионов вольт, сопровождающийся „искусственной молнией“ в 18 м длины (рис. 48).
Схема импульсного генератора, предложенная в 1916 г. не-

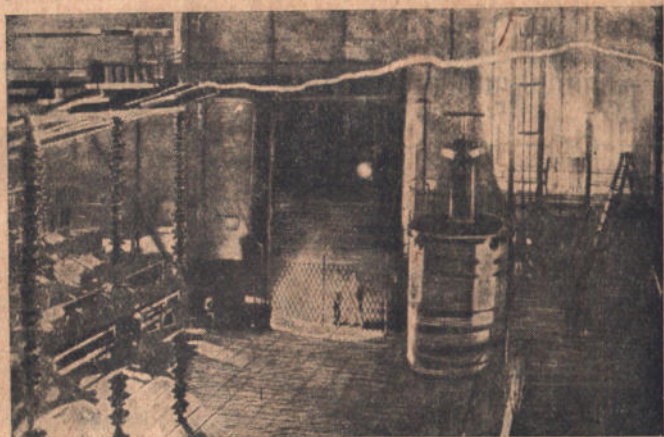


Рис. 48

мецким электриком Марксом, необычайно проста. Принцип ее заключается в том, что батарея высоковольтных конденсаторов, включенных параллельно, заряжается от питающей установки до некоторого напряжения, которое определяется конструкцией конденсаторов. В следующий момент конденсаторы автоматически переключаются с параллельного соединения на последовательное, при чем напряжения всех конденсаторных элементов складываются, достигая подчас громадной величины, ограничи-

Заслуживает внимания остроумное ухищрение, с помощью которого томские физики пытаются избежать затруднений, связанных с введением высокого напряжения вторичной обмотки трансформатора Тесла в разрядную трубку. Они обходятся совсем без этого ввода, располагая всю вторичную обмотку внутри разрядной трубки. Разумеется, этот метод обладает и своими недостатками: откачка трубки, вследствие введения внутрь нее значительного количества проволоки и изолирующего материала, осложняется, однако предварительные опыты, поставленные с таким „трансформатором-трубкой“, дали вполне благоприятные результаты.

ваемой только числом конденсаторов, т. е. размерами и стоимостью установки.

Переключение конденсаторов с параллельного соединения на последовательное происходит с помощью разрядников, включенных по образцу, показанному на рис. 49, где изображена схема импульсного генератора всего из четырех конденсаторных элементов, которая позволяет получить напряжение, превышающее напряжение питающей установки в четыре раза. Конденсаторы C_1, C_2, C_3 и C_4 соединены параллельно через большие сопротивления R_1, R_2, R_3 и R_1^1, R_2^1, R_3^1 . Питающая установка, состоящая из высоковольтного трансформатора T и выпрямителя K , заряжает их до тех пор, пока в разряднике Z^1 не проскочит искра. Тогда конденсаторы C_1 и C_2 оказываются включен-

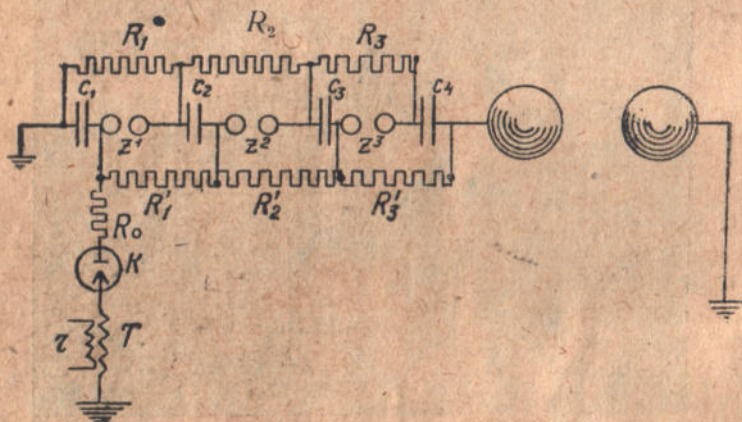


Рис. 49

ными последовательно, благодаря чему на разряднике Z^2 получается удвоенное напряжение, вследствие чего он, конечно также пробивается. То же происходит и с разрядником Z^3 .

Таким образом, все четыре конденсатора оказываются включенными последовательно через искры в разрядниках, и на конце установки мгновенно получается учетверенное напряжение. Так как, однако, конденсаторы вместе с тем включены и параллельно, через сопротивления, то они после мгновенного удара напряжения довольно быстро разрядятся через них, и повторный удар произойдет только тогда, когда питающая установка вновь зарядит их до потенциала, достаточного для образования искры в разряднике Z^1 .

Эта схема может быть составлена и из значительно большего количества конденсаторов, разрядников и сопротивлений, так что с ее помощью можно получить теоретически сколь угодно высокое напряжение.

Импульсные генераторы получили широкое распространение в электротехнике, так как с их помощью удается воспроизвести те мгновенные перенапряжения, которым подвергаются в условиях эксплуатации элементы промышленных высоковольтных установок под влиянием грозových разрядов, коротких замыканий и других кратковременных явлений, имеющих место при эксплуатации. Использование импульсных генераторов для питания разрядных трубок представлялось весьма заманчивым в связи с тем, что образование разрядов при очень коротких ударах напряжения сильно затруднено, благодаря чему можно было надеяться, что трудности, связанные с возникновением преждевременного разряда в трубке, можно будет преодолеть значительно легче при импульсном напряжении, нежели при напряжении переменном технической или высокой частоты.

Впервые построением разрядной трубки для ударного напряжения занялись Браш и Ланге, отказавшиеся от мысли использовать для получения быстрых ионов грозвое электричество. После продолжительных опытов на горе Женерозо в их распоряжение был предоставлен импульсный генератор фирмы АЕГ (Германия), фотография которого приведена на рис. 50.

Этот генератор, один из наиболее мощных импульсных генераторов в мире и самый мощный в Европе, установлен на крыше высоковольтной лаборатории АЕГ и состоит из 12 групп по 5 конденсаторов в каждой. Каждая группа заряжается до 200 000 вольт, так что в момент разряда, происходящего в одиннадцати шаровых разрядниках, соединяющих все конденсаторные элементы последовательно, происходит удар напряжения в 2 400 000 вольт. Отдельные конденсаторные элементы представляют собой плотно закупоренные металлические бачки, внутри которых, под слоем высококачественного трансформаторного масла находятся стопки пропитанной бумаги, прослоенной проводящими листами тонкой фольги. Емкость конденсаторных элементов благодаря такой конструкции весьма значительна, так что генератор не только дает удар очень высокого напряжения, но в то же время развивает в момент разряда весьма значительную мощность.

Так как в распоряжении Браша и Ланге оказался чрезвычайно удобный и мощный источник напряжения в виде готовой тех-

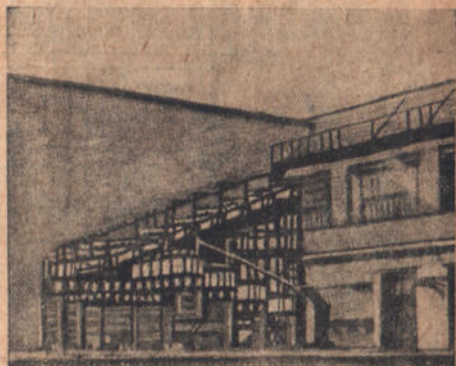


Рис. 50

нической установки одной из крупнейших электротехнических фирм Европы, они отказались от дальнейших попыток использования атмосферного электричества и всю работу переключили на конструирование своей разрядной трубки.

Трубка Браша
и Ланге

Задача построения сверхвысоковольтной разрядной трубки, предназначенной для работы при ударном напряжении, несколько облегчается тем, что при кратковременных электрических импульсах, с одной стороны, значительно затрудняется образование скользящих разрядов, перекрытия по внешней поверхности трубки и т. д., с другой — всевозможные утечки играют совершенно второстепенную роль.

В самом деле, в момент удара генератор развивает громадную мощность, давая десятки (а иногда и больше) ампер при напряжении, измеряемом миллионами вольт, так что с утечками в несколько миллиампер, десятков и даже сотен миллиампер считаться вовсе не приходится. В силу этого гораздо проще разрешаются вопросы, связанные с изоляцией трубки и всей установки, требуется менее тщательная ее откачка, отпадает необходимость в предварительном обезгаживании металлических частей трубки и т. д.

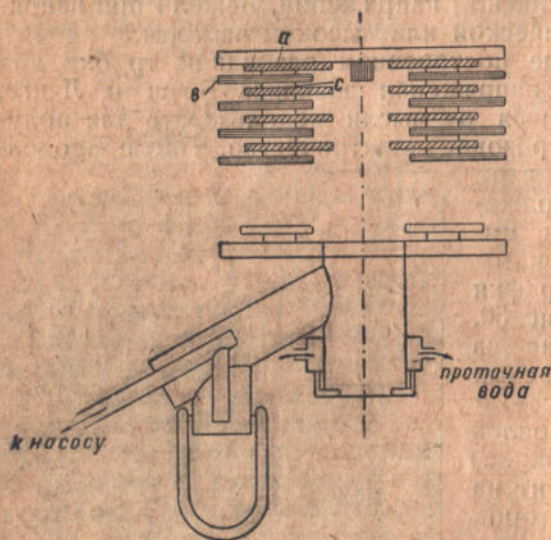


Рис. 51

При конструировании своей трубки Браш и Ланге поэтому смогли воспользоваться приемом, который позволил им достигнуть очень большого успеха в деле построения сверхвысоковольтных разрядных трубок и поставить непревзойденный до сих пор рекорд, введя в разрядную вставку свыше двух миллионов вольт. Свободные от необходимости тщательного обезгаживания стенок трубки, эти исследователи смогли отказаться от традиционного материала, используемого для построения разрядных трубок — стекла.

О конструктивном осуществлении трубки Браша и Ланге можно составить себе представление из ее схемы, изображенной на рис. 51, и фотографии установки, представленной на рис. 52.

Эта трубка в а б р а н а из чередующихся турбовитовых,¹ резиновых и алюминиевых шайб, при чем между каждым соседними твердыми кольцами проложена резиновая шайба, обеспечивающая уплотнение.

Благодаря тому, что все кольца имели различный внутренний и наружный диаметры, внешняя и внутренняя поверхности трубки становились ребристыми, так что путь для скользящего разряда вдоль трубки чрезвычайно удлинялся.

Так как трубка при общей длине всего в 84 см состоит из двухсот комплектов (турбонит - резина - алюминий - резина) и длина пути скользящего разряда в каждом комплекте достигает 12 см, то полная длина пути для всей трубки — около 25 м. Кроме того, при такой конструкции стенка трубки на все сто процентов гарантирована от пробоя.

В самом деле, прежде всего „толщина стенки“ сама по себе чрезвычайно велика (минимально, для резиновых колец — 1,5 см.), а, кроме того, введенные в каждом комплекте металлические прослойки не позволяют образоваться на стенке значительной разности потенциалов. Наконец, те же металлические прокладки представляют собой как бы ряд включенных последовательно совершенно одинаковых конденсаторов, благодаря чему в момент удара на все отдельные секции трубки приходится одно и то же падение потенциала, т. е. осуществляется автоматически принудительное равномерное распределение.

Материалы, из которых набрана трубка, а в особенности турбонит и резина, выделяют значительное количество газов, благодаря чему трубка во время работы должна непрерывно интенсивно откачиваться, что и производится с помощью мощного стального диффузионного насоса, в котором струя ртутного пара захватывает выделяющийся из трубки газ. Для того чтобы предотвратить попадание ртутных паров из насоса в трубку,

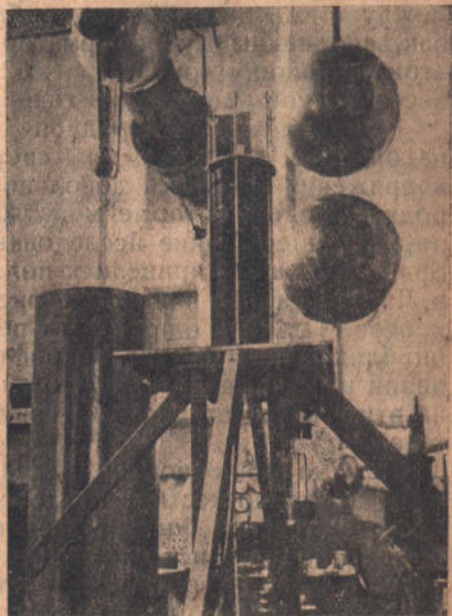


Рис. 52

¹ Турбонит — изоляционный материал, изготавливаемый путем горячей прессовки из бумаги, пропитанной бакелитовым лаком.

а, с другой стороны, предохранить насос от загрязнения летучими жидкостями, выделяющимися из стенок трубки, в трубопроводе от трубки к насосу становится так называемая „ловушка“, в которой ртуть и пары вымораживаются жидким воздухом (при температуре около -180°C). Конструкция этой ловушки показана на рис. 51.

Вверху и внизу трубка заканчивается металлическими дисками, из которых нижний, подвергающийся электронной бомбардировке, охлаждается проточной водой.

Для предотвращения непосредственного разряда по воздуху между этими дисками вся трубка помещается в изолирующий бак, заполненный трансформаторным маслом. К построенной по этому принципу трубке (рис. 52) Брашу и Ланге удалось подвести полное напряжение генератора АЕГ, т. е. 2.400.000 вольт.

При наличии в разрядной трубке небольшого количества паров воды, водорода или светильного газа, в момент удара напряжения создается довольно значительное количество водородных ионов, которые могут быть использованы для бомбардировки ядер. Такие исследования были поставлены на трубке Браш и Ланге и привели к положительным результатам: Брашу и Ланге удалось наблюдать расщепление ядер ряда легких элементов. Так как, однако, эти результаты были получены после опубликования работы Кокрофта и Уолтона, а методика наблюдения применялась та же, что и у других авторов, мы остановимся на этих результатах при описании работы английских исследователей.

Помимо этой основной задачи, большой интерес представляют те чрезвычайно жесткие и интенсивные рентгеновы лучи, которые испускаются при бомбардировке металлической крышки трубки бешено несущимися электронами, набравшими громадную скорость в 2,5 млн вольт. Эти рентгеновы лучи, по данным Браша и Ланге, довольно свободно пронизывают 10 см свинца и, благодаря своей огромной проникающей способности, смогут найти себе применение в металлообрабатывающей промышленности для просвечивания массивных изделий на внутренние пороки и т. д. На первый взгляд представляется несомненным, что опыты Браша и Ланге намечают единственный путь правильного решения проблемы создания искусственных снарядов для разрушения ядер; однако наряду с огромными преимуществами, которыми отличаются импульсные генераторы и соответствующие трубки перед другими методами получения быстрых заряженных частиц, они обладают немаловажными недостатками.

К числу достоинств импульсных генераторов относится, в первую очередь, то, что при пользовании ими в качестве источников напряжения отпадают или, во всяком случае, сильно ослабляются специфические высоковольтные трудности, как образование короны, скользящих разрядов, громадной длины искры между острями.

Во-вторых, отходят на второй план всевозможные потери в изоляции, благодаря чему могут быть чрезвычайно значительно снижены требования к изоляционным материалам, применяемым в этих установках. Так, для импульсного воздействия могут рассматриваться как удовлетворительные изоляторы — сырое трансформаторное масло самого низкого качества и даже, в некоторых случаях, дистиллированная вода, воздушно сухое дерево, пеньковый канат и т. п.

В-третьих, возникающий внутри самой трубки разряд не снижает подведенного к ней напряжения, если только источник (генератор) обладает достаточной энергией; наконец, если предотвращен скользящий разряд по внутренней стенке трубки (подразделение металлическими прокладками), то выделение газов из стенок играет второстепенную роль, благодаря чему отпадает необходимость в тщательном обезгаживании этих стенок, а, следовательно, можно отказаться от стекла в качестве материала, что сулит громадные конструктивные возможности.

Недостатки импульсных установок обнаруживаются тогда, когда созданные внутри соответствующих трубок снаряды направлены на исследуемые ядра.

Благодаря тому, что опыт продолжается, в сущности, лишь во время импульса (стотысячные или миллионные доли секунды), необходима необычайно сложная экспериментальная техника для изучения тех явлений, которые разыгрываются при бомбардировке ядер с помощью такой трубки.

Задача произвести опыт за одну стотысячную долю секунды хотя и не так безнадежна, как может показаться с первого взгляда, но все же принадлежит к чрезвычайно сложным экспериментальным проблемам и заставляет многих экспериментаторов искать других путей для создания быстрых ионов, несмотря на многочисленные перечисленные нами преимущества трубок, питаемых импульсными генераторами.

К числу наиболее остроумных методов получения быстрых ионов принадлежит способ переменного поля, предложенный и разработанный известным американским физиком Лауренсом и его учениками. В отличие от всех описанных нами методов, в нем не приходится пользоваться высоким напряжением, вследствие чего отпадают основные затруднения, связанные с получением последнего и вводом его в вакуумную трубку.

Идея Лауренса в своей основе чрезвычайно проста. Представим себе источник ионов J в пустотной трубке и ряд металлических экранов с отверстиями (диафрагм) $d_1 \dots d_6$ (рис. 53). Батарея B_1 , включенная между источником ионов и первой диафрагмой, ускоряет ионы, которые подходят к отверстию d_1 , обладая скоростью, соответствующей разности потенциалов, даваемой этой батареей. Пусть в нашем распоряжении есть

Метод последовательного ускорения ионов переменным полем

К числу наиболее остроумных методов получения быстрых ионов принадлежит способ переменного поля, предложенный и разработанный известным американским физиком Лауренсом и его учениками. В отличие от всех описанных нами методов, в нем не приходится пользоваться высоким напряжением, вследствие чего отпадают основные затруднения, связанные с получением последнего и вводом его в вакуумную трубку.

еще одна батарея B_2 ; включив ее в какой-нибудь момент между d_1 и d_2 , мы „подхлестнем“ ионы, прошедшие через диафрагму d_1 , добавив им скорость, соответствующую потенциалу этой батареи V_2 . Если мы мгновенно переключим ее между d_1 и d_3 , то мы вторично подбавим скорости нашей партии ионов, которая уже будет соответствовать разности потенциалов $(V_1 + 2V_2)$.

„Гоняясь“ за нашей партией ионов и „подхлестывая“ ее в каждом промежутке между соседними диафрагмами, мы сможем довести их скорость к концу трубки, возле экрана E , до $(V_1 + nV_2)$, где n — число „пролетов“ — промежутков между диафрагмами. Постепенно ускорить ионы, заставив их пройти повторно одну и ту же разность потенциалов — вот, в чем заключается идея Лауренса. Разумеется, в описанном нами виде этот опыт на практике неосуществим.

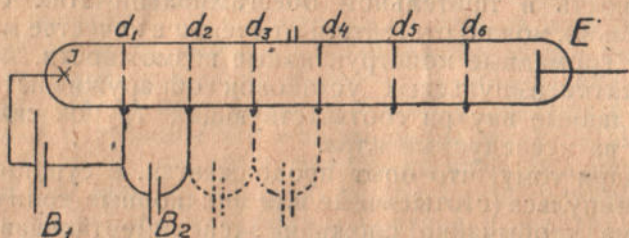


Рис. 53

Скорость ионов, которой мы хотим добиться при создании снарядов для исследования ядра, настолько значительна, что, переключая батарею „от руки“ или даже с помощью самого совершенного переключателя, угнаться за ускоряемыми ионами невозможно.

Однако Лауренс удачно развил свою идею, преодолев это затруднение с помощью применения переменного напряжения высокой частоты. Для того чтобы разобраться в действии его установки, рассмотрим ее схему, изображенную на рис. 54. Основная часть прибора Лауренса, предназначенного для ускорения тяжелых ионов, представляет собой ряд расположенных друг за другом металлических трубок a, b, c, d . В приборе Лауренса их было до 30 штук, на нашей же схеме мы ограничимся четырьмя. Эти трубки через одну присоединены к полюсам высокочастотной генераторной установки, дающей переменное напряжение с частотой около десяти миллионов периодов в секунду (длина волны — около 30 м.). По оси первой трубки (на нашей схеме — слева направо) пускается пучок ионов. Пока эти ионы находятся внутри трубки, на них не действует электрическое поле. Как только ионы дошли до края трубки, они попадают в промежуток между a и b , в котором действует переменное поле, созданное высокочастотной установкой.

Установка
Лауренса для
тяжелых
ионов

Если в данный момент направление поля благоприятствует их пролету (цилиндр a заряжен положительно, b — отрицательно), то они подхватываются „попутным“ полем, и к тому моменту, когда напряжение генератора равно нулю, они уже опять экранированы, защищены от поля внутри цилиндра b . Пролетев этот цилиндр, они подлетают к промежутку между b и c в тот момент, когда поле в этом промежутке опять является для них попутным. Таким образом, в каждом последующем промежутке ионы будут ускоряться, если только к этому промежутку они будут подлетать своевременно, т. е. в момент попутного поля. Чтобы удовлетворить этому условию, приходится делать трубочки возрастающей длины, так как в противном случае ионы по мере своего ускорения требовали бы для пролета последующих цилиндров все меньшего и меньшего проме-



жутка времени и подлетали бы к соответствующим промежуткам не в надлежащий момент.

Общий вид трубки Лауренса для тяжелых ионов приведен на рис. 55. В виду своей большой длины схема разделена на две части. Рассматривая слева направо нижнюю ее половину, мы встречаем источник ионов в виде баллона, заполненного разреженным тяжелым газом (например, парами ртути), где помещен раскаленный катод и анод, между которыми создана небольшая постоянная разность потенциалов. Электроны, испускаемые раскаленным катодом, на своем пути к аноду приобретают скорость, достаточную для ионизации (отщепления электронов от нейтральных атомов ртути); образовавшиеся таким образом положительные ионы ртути отсасываются через боковую трубку электрическим полем, созданным между катодом и вспомогательным цилиндром A , и, пролетев второй цилиндр B , попадают в систему ускоряющих трубочек, действие которых было нами только что описано. В конце трубки (правый верхний угол рисунка) ионы, ускоренные в трубке, проходят между заряженными пластинами, и по величине поля, которое необходимо создать между этими пластинами для того, чтобы, завернув пучок ионов на угол в 3° , заставить их попасть в цилиндр, соединенный с чувствительным электрометром, определяется их скорость.

Контрольные измерения показали, что построенный таким образом прибор полностью оправдал надежды своих конструкторов.

Рис. 54

торов. Пользуясь высокочастотной установкой на 42 000 вольт и трубкой с 30 ускоряющими цилиндрами, они довели скорость ионов ртути, прошедших сквозь трубку, до $30 \times 42\,000$, т. е. до 1 260 000 вольт.

Однако, несмотря на этот исключительный успех, эта конструкция трубки была вскоре оставлена Лауренсом по следующим соображениям. Наибольший интерес в смысле исследования ядра представляет бомбардировка последнего частицами, ядра которых обладают незначительным зарядом, как H -частицы и α -частицы. Если этими частицами можно было надеяться разрушить ядра, придав им энергию около одного миллиона вольт,

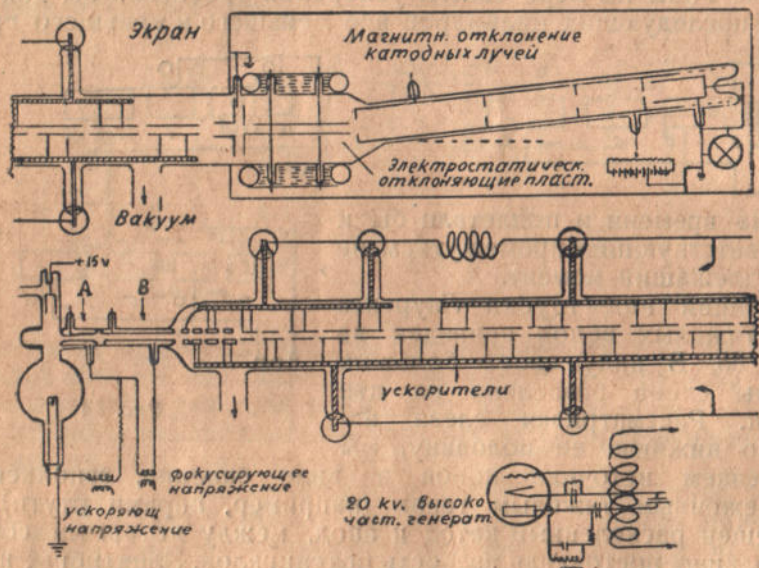


Рис. 55

то тяжелым ядрам, подобным ртути, подобраться к бомбардируемому ядру, вследствие сил взаимного отталкивания, которые тем больше, чем больше положительный заряд „снаряда“, — значительно труднее.

Между тем описанная конструкция трубки Лауренса позволяет ускорить лишь наиболее тяжелые ионы. При попытке ее применения для получения, скажем, быстрых протонов возникают непреодолимые технические трудности, связанные с размерами трубки. В самом деле, чем легче ион, тем большую скорость он получит под действием заданной разности потенциалов; следовательно, тем более длинными должны быть отдельные „ускоряющие цилиндрики“, — тем больше размеры и всей трубки. Если трубка, в которой удалось ускорить ионы

ртути до 1 260 000 вольт, достигала в длину около 1,5 м, то трубка для сообщения той же энергии протонам должна быть примерно в $\sqrt{200}$, т. е. в 14 с лишком раз длиннее, достигая в длину свыше 20 м.

Нё говоря уже о том, что построение подобной трубки при современном положении техники пустотных приборов вряд ли оказалось бы возможным, она оказывается неосуществимой еще и по ряду других соображений (пучок ионов на столь длинном пути неизбежно был бы в сильнейшей степени ослаблен, при указанных размерах трубки вряд-ли можно рассчитывать на правильную работу высокочастотной установки и мн. др.).

Все эти соображения заставили Лауренса разработать еще один вид трубки, основанный на том же принципе, но рассчитанный специально для ускорения легких ионов (протонов).

Установка Лауренса для легких ионов так же вторым приборе Лауренс пользуется как же повторным подхлестыванием ионов переменным электрическим полем, которое всегда оказывается попутным, когда ионы попадают в пространство, где это поле на них действует. Вместе с тем он преодолевает затруднения, связанные с большим размером прибора для легких ионов, заворачивая последние с помощью магнитного поля и заставляя их переходить из одного полого электрода в другой, заменяя таким образом прямолинейный путь ионов в первом приборе — спиральным.

Все это проще понять на схеме прибора, приведенной на рис. 56.

Два электрода *A* и *B*, в виде двух половинок плоской цилиндрической коробки, смонтированы в откочанном приборе, который помещается между полюсами электромагнита. К электродам подается высокочастотное переменное напряжение, так что в зазоре между электродами *A* и *B* образуется переменное электрическое поле.

Очевидно, что, если в тот момент, когда электрод *A* отрицателен, а *B* положителен, в точке *a* зазора между электродами находится какой нибудь ион, то он будет втянут внутрь первого из электродов. Как только он попадет внутрь него, он оказывается защищенным от действия поля и должен был бы двигаться по инерции прямолинейно, если бы не магнитное поле, которое заставляет его завернуть и двигаться внутри электрода *A*, описывая полукруг *ab*. Если за то время, пока ион пролетает этот путь, прошло ровно полпериода переменного напряжения, т. е. положительным стал электрод *A*, а отрицательным *B*, то, залетев в зазор между электродами, ион снова будет в нем ускорен, войдет внутрь *B* уже с большей скоростью, в силу чего магнитное поле завернет его по кругу уже большего радиуса.

Так как длина пути иона во время каждого из его путешествий внутри электрода будет с каждым разом расти точно в

той же мере, что и его скорость, то, следовательно, ион будет оставаться внутри каждого из электродов один и тот же промежуток времени. Отсюда следует, что ион, попавший „в удачный момент“, т. е. при „попутном поле“, в зазор между электродами, после первого своего оборота уже „не сообразится с такта“ и будет после каждого полуоборота подхлестываться

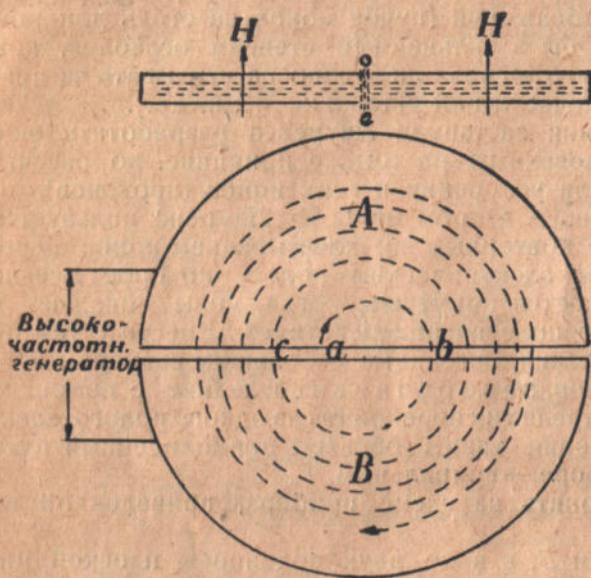


Рис. 56

полем в зазоре и циркулировать по расходящейся спирали с все увеличивающейся скоростью. Наконец, когда ион развертываясь ударится в обод коробки, он будет обладать скоростью, соответствующей напряжению, во столько раз большему приложенного к прибору, сколько полуоборотов он совершил на своем спиральном пути.

Так, например, в приборе, построенном Лауренсом и Ливингстоном, протоны совершали до 150 полных обо-

ротов. Максимальное значение приложенного к электродам высокочастотного напряжения составляло всего 4 000 вольт. Таким образом, ионы на своем пути 300 раз ускорялись этими четырьмя тысячами вольт, благодаря чему, в результате, набирали скорость до 1 200 000 вольт.

Некоторые детали экспериментальной установки Лауренса и Ливингстона представлены схематически на рис. 57, а на рис. 58 приведена фотография внутренней части их прибора.

Электрод был изготовлен в виде тонкостенного плоского полуцилиндра диаметром в 24 см. и высотой в 1 см, который был заключен внутри плоской медной коробки квадратной формы $28,6 \times 28,6$ см, высотой в 2,6 см. (рис. 58).

Таким образом, в приборе был только один из изображенных на рис. 56 электродов; другим электродом служила окружающая внутренний электрод квадратная коробка.

Эта коробка была разделена перегородкой со щелью, в которой была натянута проволочка, нагреваемая электрическим током. Это устройство служило для создания водородных ионов

(протонов). Между калящейся проволочкой и перегородкой прикладывалось небольшое постоянное напряжение (около 150 вольт), при чем нить имела отрицательный заряд, так что испускаемые ею электроны захватывались полем и двигались перпендикулярно плоскости рис. 57 и 58.

Сталкиваясь на своем пути с нейтральными атомами водорода (которым при давлении около одной десятитысячной миллиметра была заполнена коробка), они ионизовали их, создавая

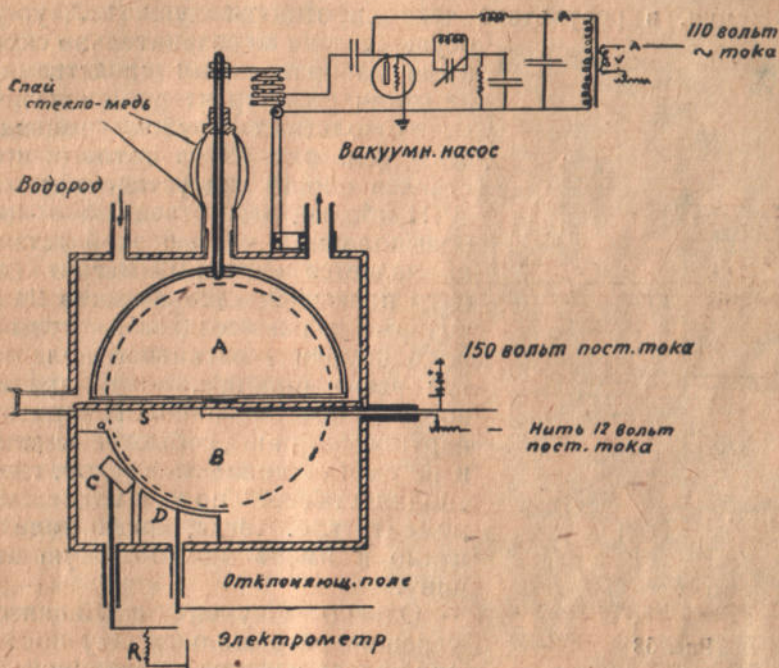


Рис. 57

протоны, так что щель с калящейся проволочкой внутри нее представляла непрерывно действующий источник положительных ионов водорода. Эти ионы захватывались переменным полем внутрь пустотелого электрода А и, раскручиваясь описанным выше образом по расходящейся спирали, попадали, в конце концов, в пространство между отклоняющими пластинами D и a, которые вместе с отведенным к электрометру цилиндром С служили для измерения скорости разогнанных в приборе протонов (подобно тому, как в первом приборе Лауренса для тяжелых ионов).

Контрольные измерения скоростей протонов показали, что прибор работает вполне удовлетворительно. Обращаясь по спиральным путям, протоны, совершив полных сто пятьдесят обо-

ротов, триста раз „подхлестнутые“ на своем пути напряжением в 4 000 вольт, набирали скорость до 1 200 000 вольт.

Эта установка Лауренса представляет собой крупную победу экспериментальной техники, в сложнейшей проблеме создания „протонной пушки“ для бомбардировки ядер.

Особенно удивительно то обстоятельство, что, благодаря остроумной идее изобретателя, в этой установке (как впрочем и в первом приборе для тяжелых ионов) отпадают все трудности, связанные с получением и введением в вакуум высокого напряжения, в результате чего „протонная пушка“ Лауренса

осуществлена со сравнительно скромными лабораторными средствами и не отличается характерной для сверхвысоковольтных трубок громоздкостью (см. рис. 59, на котором представлен общий вид установки).

Наиболее ответственной и трудновыполнимой частью этой установки является огромный магнит (диаметр полюсных наконечников 28 см), который должен создавать чрезвычайно однородное магнитное поле внутри всего прибора, иначе правильность спирального полета протонов нарушится, они „сбьются с такта“ и не смогут попадать в зазор, где их „подхлестывает“ поле, в надлежащий момент, т. е. тогда, когда поле попутно и имеет максимальную величину.

Однако Лауренс и Ливингстон успешно разрешили задачу построения своего магнита и протонной пушки

на 1 200 000 вольт. Мало того, в своей последней работе они пишут о том, что они приступили к постройке по тому же принципу прибора для получения протонов со скоростями до 25 000 000 вольт.

Для этой цели они строят чудовищный электромагнит с полюсными наконечниками диаметром в *сто четырнадцать сантиметров* и собираются заставить протоны сделать 250 полных оборотов, ускоряя их в 500 раз напряжением в 50 000 вольт. Эта грандиозная техническая задача вряд ли будет разрешена в течение ближайших двух лет; однако уже осуществленная Лауренсом „скромная“ протонная пушка на 1 200 000 вольт представляет собой ценнейшее орудие для исследования ядра.

Однако и прибор Лауренса обладает одним существенным недостатком, вследствие которого в настоящий момент первенство в деле исследования ядра осталось все же за высоко-

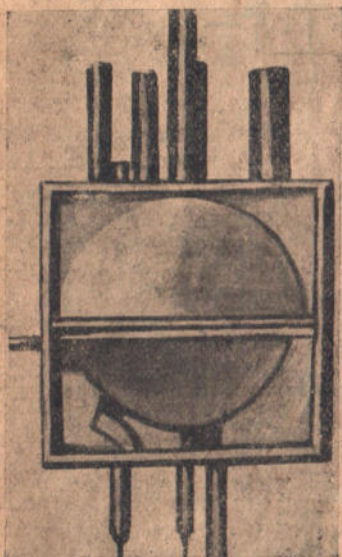


Рис. 58

вольтной трубкой. Этот недостаток заключается в том, что в результате громадной длины пути, который пролетают в нем протоны (свыше 50 м), и величайшей чувствительности прибора к малейшим отклонениям от однородности магнитного поля (которое, конечно, не может быть сделано идеально однородным), только очень ничтожное число „счастливых“ протонов благополучно проходит свой спиральный „жизненный путь“, так что протонный ток, попадающий в отведенный к электрометру цилиндр С, Лауренсу при всех усилиях не удалось довести до величины, значительно превышающей одну миллиардную (10^{-9}) долю ампера.

Такой ток, правда, совсем не неизмеримо мал. Современная физика располагает приборами, позволяющими измерять токи еще в миллион раз меньше, однако, как мы увидим в дальнейшем, поток протонов, соответствующий току в миллиардную долю ампера, при котором в одну секунду на электрод падает свыше миллиарда протонов, еще не является ураганным огнем для разрушения ядер в количествах, достаточных для всестороннего исследования.

Вот этот единственный и вместе с тем чрезвычайно существенный недостаток методики Лауренса — недостаточная интенсивность протонного пучка — заставляет в настоящее время считать наиболее обещающим типом протонных пушек разрядные трубки, питаемые высоким напряжением, но, в отличие от рассмотренных нами импульсных и высокочастотных трубок, напряжением постоянным.

К описанию соответствующих установок и трубок мы и переходим, оговорившись, что нет ничего невероятного в том, что дальнейшее развитие и усовершенствование приборов типа Лауренса сможет снова и даже в ближайшем будущем изменить

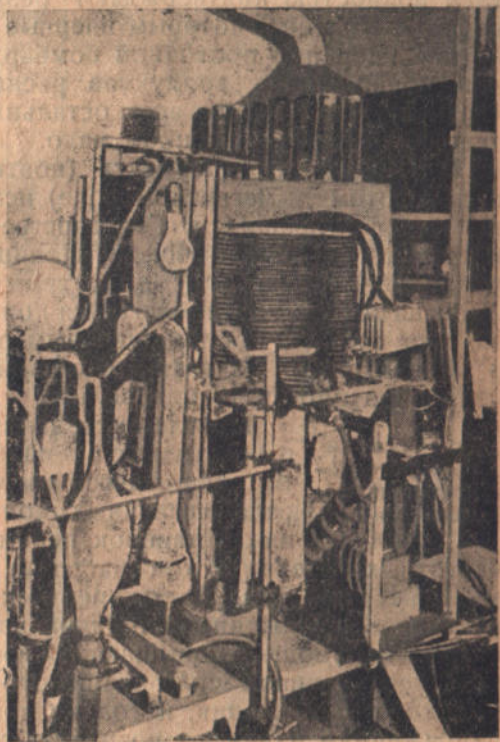


Рис. 59

соотношение сил в пользу „невысоковольтных трубок“, так как в них многие технические трудности разрешаются значительно остроумнее и проще, чем в трубках сверхвысоковольтных.

Лауренс осенью 1932 г., несмотря на малую силу протонного тока, получаемую в его разрядной трубке, все же добился расщепления ядер лития ударами быстрых протонов. Его результаты полностью подтверждают результаты исследований Кокрофта и Уолтона, которым впервые удалось наблюдать расщепление ядер при протонной бомбардировке. В опытах Лауренса для обнаружения продуктов распада лития служил счетчик частичек, так как для всех остальных методов количество распадающихся ядер слишком мало.

В СССР идею Лауренса (повторное ускорение протонов с заворотом в магнитном поле) использует группа исследователей, работающих в Государственном физико-техническом институте академика Иоффе (Ленинград). Ими уже сконструирован электромагнит с диаметром полюсных наконечников в 28 см, на котором предполагается получить протоны со скоростью 1,5 млн вольт, а Государственным радиевым институтом (также в Ленинграде) заказан большой электромагнит для получения протонов в 10 млн вольт.

Проблема создания источника очень высокого постоянного напряжения обладает некоторыми специфическими чертами, отличающими ее от задач, связанных с конструированием высоковольтных установок переменного напряжения (высоко-частотных и технической частоты) и импульсных, о которых мы уже говорили. В то время, как получение переменного высокого напряжения принципиально чрезвычайно легко осуществимо с помощью повышающих трансформаторов, преобразующих ток большой силы и низкого напряжения в слабый ток высокого напряжения, и только при переходе к сверхвысоким напряжениям начинают возникать серьезные трудности, связанные с увеличением габаритов и стоимости установок, конструирование высоковольтной установки постоянного напряжения с самого начала встречает трудность, заключающуюся в отсутствии способа, позволяющего произвести подобное трансформирование постоянного тока. Поэтому в громадном большинстве установок постоянного тока высокого напряжения повышенное напряжение производится, как говорят, „на стороне переменного тока“, и только переменный ток высокого напряжения преобразуют (выпрямляют) в постоянный.

Таким образом, в высоковольтной установке постоянного напряжения приходится различать элементы, повышающие переменное напряжение, и элементы, преобразующие переменный ток высокого напряжения в постоянный.

Единственным и вместе с тем старейшим способом непосредственного получения постоянного тока высокого напря-

жения являются электростатические машины — прибор хорошо известный, несмотря на то, что вследствие своей малой мощности он не получил каких-либо серьезных технических применений. До последнего года об электростатических машинах как источнике сверхвысоких постоянных напряжений никто и не думал, так как существующие конструкции дисковых электростатических машин позволяли получать в лучшем случае напряжение около ста тысяч вольт при совершенно ничтожной мощности.

В связи с задачей построения источника постоянного напряжения для питания „протонных пушек“ заслуживает внимания изобретение молодого американского физика ван-Граафа,

которому удалось сконструировать электростатическую машину на полтора миллиона вольт, применив новый принцип, идея которого заключается в следующем. Хорошо известно, что, при прикосновении заряженного тела к внутренней поверхности пустотелого проводника весь заряд переходит на внешнюю поверхность последнего. Поэтому, подводя непрерывно заряд к внутренней поверхности

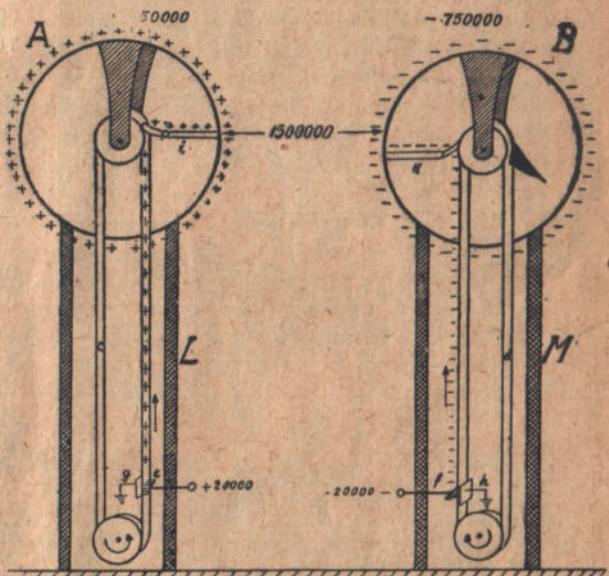


Рис. 60

какого-либо металлического тела, можно увеличивать накопленный на нем заряд до очень значительной величины, т. е. сильно повысить его потенциал. Дальнейшее повышение потенциала прекратится тогда, когда увеличивающиеся с повышением потенциала утечки уравновесят подток заряда. Следовательно, для осуществления электростатической машины по этому принципу необходимо разрешить следующие задачи: во-первых, обеспечить непрерывный подток заряда на внутреннюю поверхность электрода, во-вторых — свести до минимума всевозможные утечки, т. е. уменьшить проводимость опор, на которых покоится этот электрод, устранить для затруднения образования короны все неровности, острые углы на электроде и т. п.

Эти две задачи ван-Грааф остроумно разрешает в своей электростатической машине, схема которой изображена на рис. 60.

Два медных пустотелых, тщательно отполированных (во избежание преждевременного образования „короны“ — истечения с острий) шара *A* и *B* диаметром около 80 см смонтированы на пустотелых изолирующих колоннах *L* и *M*, внутри которых движутся две бесконечные шелковые ленты *c* и *d*, служащие транспортерами для электрических зарядов. Вблизи нижних ведущих

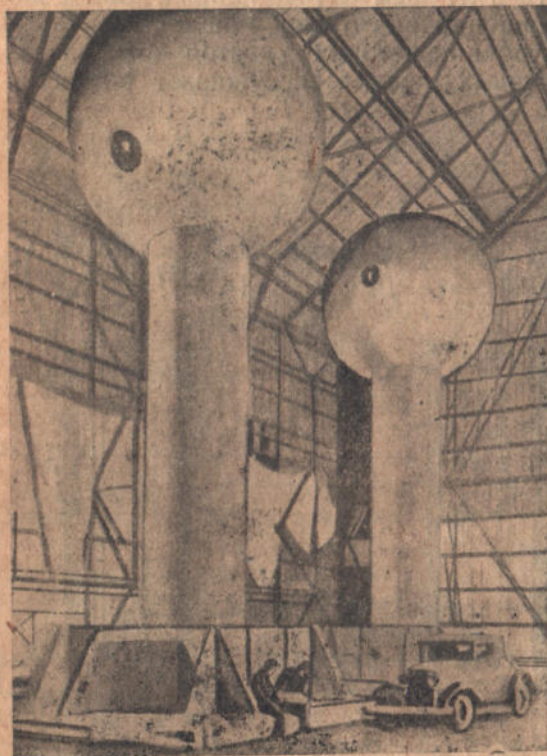


Рис. 60-а

валиков, вращаемых электромоторами, ленты проходят между отведенными к земле пластинками *g* и *h* и гребешками *e* и *f*, которые заряжаются от вспомогательных источников постоянного напряжения соответственно до $+$ и $-20\,000$ вольт. Заряд стекает с острий гребешков, заряжая поверхность лент, и вносится ими через прорезы внутрь шаров, где и снимается собирающими приспособлениями *i* и *k*,¹ переходя на внешнюю поверхность шаров.

При указанном размере шаров ван-Граафа удалось зарядить в отдельности каждый из них соответственно до $+$ и $-750\,000$ вольт. Дальнейшему приращению потенциала препятствовало появление корон.

Таким образом, с самыми примитивными средствами машина ван-Граафа позволяет создать между шарами разность потенциалов в $1\,500\,000$ вольт. Увеличивая размеры шаров, ширину и скорость ленты, этот исследователь надеется достигнуть значительно более высоких напряжений (до 10 млн вольт), и он уже приступил к постройке огромной машины с шарами диаметром в 5 м, фотография которой приведена на рис. 60-а.

¹ На схеме собирающие приспособления *i* и *k* изображены в виде трущихся щеток. В действительности у ван-Граафа они выполнены несколько сложнее, но для уяснения действия установки это не играет роли.

Несмотря на крайнюю простоту, машина ван - Граафа, вопреки грандиозной шумихе, поднятой вокруг нее в американской прессе, в своем настоящем виде обладает громадным недостатком, который заключается в чрезвычайно малой величине тока, который может быть создан в трубке, питаемой от такой машины. В самом деле, как размеры, так и скорость движения ленты в этой машине не могут быть увеличены очень значительно, так что предельный ток, который можно надеяться получить с машины такого рода (значительная часть которого неизбежно будет расходоваться на всевозможные утечки, помимо протонного тока в трубке), вряд ли позволит осуществить достаточно интенсивную бомбардировку ядер протонами. В связи с этим наиболее обещающим методом создания постоянных сверхвысоких напряжений необходимо все же признать установки, основанные на выпрямлении переменного тока, к описанию которых мы и перейдем.

Установки постоянного высокого напряжения с кенотронами

В настоящее время получил широкое распространение целый ряд установок постоянного высокого напряжения, в которых в различных комбинациях встречаются три основных элемента: высоковольтные трансформаторы, конденсаторы и выпрямители, или вентили. В нашу задачу здесь не входит подробное рассмотрение различных типов подобных установок. Интересующихся можно отослать к специальным брошюрам,¹ здесь же мы остановимся только на одной схеме, предложенной еще в 1924 г. немецким электротехником Грейнахером, с помощью которой в 1932 г. впервые удалось разбить ряд легких ядер протонами, о чем будет идти речь в следующей главе.

В этой схеме в качестве выпрямителей служат кенотроны — пустотные приборы, устройство которых сводится к следующему. В стеклянном сосуде, из которого чрезвычайно тщательно откачан воздух, находятся два электрода. Один из них, так называемый анод, представляет собой пластинку или цилиндр из тугоплавкого металла; другой — катод — вольфрамовую проволочку, разогреваемую до весьма высокой температуры (свыше 2000°) электрическим током. Такого рода прибор, включенный в цепь переменного тока, будет пропускать ток только в одном направлении, а именно — от анода к катоду. В самом деле: сам по себе вакуум (пустое пространство внутри прибора) не проводит тока. Ток может переноситься только электронами, испускаемыми катодом.

Когда катод положителен, электроны не могут удалиться от него, так как будут притянуты электрическими силами. Напротив, в момент, когда положителен анод, а отрицателен катод, отри-

¹ Например: А. К. Вальтер — „Сверхвысокие напряжения“, ОНТВУ, 1932 г.

цательно заряженные электроны будут срываться с катода и нести на анод, т. е. в приборе будет течь ток, за направление которого, как известно, принимают движение положительного электричества, т. е. навстречу потоку электронов (от анода к катоду).

Таким образом, кенотрон пропускает ток только в течение одной половины периода переменного тока (как говорят, одной полуволны), когда положителен анод, а отрицателен катод, и „запирает ток“ в течение другой полуволны.

Казалось бы, что задача преобразования переменного тока в постоянный, вернее в пульсирующий, прерывистый ток одного направления разрешается кенотроном на все сто процентов, однако это не совсем верно. В самом деле, в то время как кенотрон запирает ток, на него ложится полное напряжение, действующее в цепи. К сожалению, до сих пор не разрешена задача о построении кенотрона, который мог бы „запирать“ очень высокие напряжения. Предельное напряжение, которое может быть „заперто“ кенотронами технических типов, не превышает 220 000 вольт.¹ Больших напряжений кенотроны не выдерживают; в них обычно происходит пробой стеклянной стенки, образуется внутренний разряд, перекрытие по поверхности, словом, так или иначе, кенотроны при больших напряжениях выходят из строя. Поэтому для получения постоянного высокого напряжения, превышающего 220 000 вольт, нельзя непосредственно воспользоваться соответственным сверхвысоковольтным трансформатором и выпрямить его напряжение, пользуясь кенотроном, а приходится прибегать к так называемым „схемам умножения“.

Конденсаторно-вентильные схемы умножения

Схема простейшей конденсаторно - вентильной установки приведена в левой части рис. 61. Такая установка носит название удваивающей, так как на стороне выгрямленного тока получается двойное максимальное напряжение переменного тока. Эта установка состоит из высоковольтного трансформатора T , двух конденсаторов C и C_1 и двух кенотронов K и K_1 .

Рассмотрим вначале основную часть схемы — цепь $a b c c_1 a_1 a$, состоящую из вторичной обмотки трансформатора, конденсатора C и кенотрона K . Один из концов обмотки a приключен к земле, следовательно, потенциал точки a все время равен нулю (см. кривую правой части рис. 61, где изменение потенциалов различных точек схемы представлено на графике). Трансформатор дает переменное напряжение, следовательно, потенциал другого конца его вторичной обмотки b меняется от $+V_0$ до $-V_0$ (см. на графике кривую 2). Далее, включен конденсатор C . В течение первой половины периода потенциал его нижней обкладки, соединенной с точкой b , возрастает от 0 до $+V_0$;

¹ Кокрофту и Уолтону, о работе которых речь будет идти ниже, удалось построить кенотрон на 400.000 вольт.

положительный заряд, поступающий на обкладку b , притягивает из проводника cc_1 отрицательный заряд на обкладку c , а освободившийся положительный заряд этого проводника не может уйти в землю, так как по дороге встречается кенотрон K , который не пропускает тока от катода к аноду. В результате этого обкладка c остается как бы отключенной от земли, и потенциал ее V_c растет вместе с потенциалом V_b .

По мере спада потенциала на трансформаторе разогнанные в разные концы проводника cc_1 заряды вновь соединяются и одновременно с V_b становится равным нулю и потенциал V_c . Совсем иначе обстоит дело, когда потенциал V_b становится отрицательным, падая до $-V_0$.

В этом случае на обкладку c притягиваются положительные заряды, а отрицательные

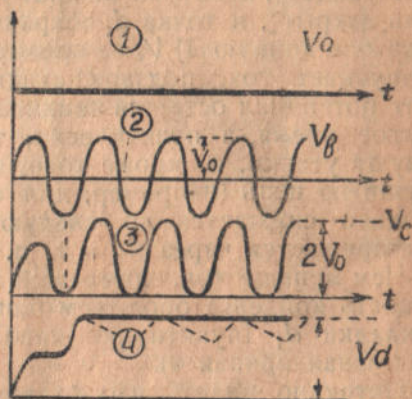
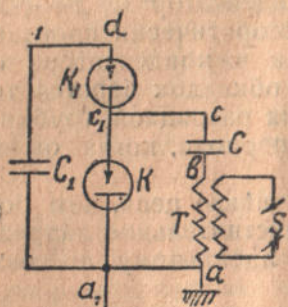


Рис. 61

свободно уходят в землю через кенотрон K , который пропускает ток от анода к катоду. Таким образом, обкладка c оказывается соединенной с землей, и ее потенциал остается равным 0, пока V_b продолжает уменьшаться. Как только, однако, потенциал V_b начинает увеличиваться, на обкладке c начинают освобождаться положительные заряды, но кенотрон уже не может пропустить ушедшие в землю отрицательные заряды, и потенциал V_c так же начинает расти. К тому времени, как V_b достигнет нуля, V_c будет уже равно $+V_0$, а когда V_b , продолжая увеличиваться, достигает $+V_0$, то V_c достигает уже $+2V_0$. Таким образом, и в дальнейшем потенциал V_c будет все время на V_0 выше чем V_b , за счет того положительного заряда, который был пойман на проводнике cc_1 в течение второй половины периода с помощью кенотрона K . Следовательно, в то время, как V_b будет меняться в пределах от $-V_0$ до $+V_0$, V_c будет изменяться от 0 до $+2V_0$, т. е. никогда не станет отрицательным. Потенциал в точке c будет непостоянный, пульсирующий, но все-таки не будет менять знака. Таким образом, в этой части схемы, состоящей из трансформатора, конденсатора и кенотрона,

совершается одновременно выпрямление напряжения и его удвоение.

Для получения постоянного удвоенного напряжения остается только „выгладить“ пульсирующее напряжение точки c , превратив его из пульсирующего в постоянное. Для этой цели служит вторая часть схемы, цепь $C_1 d d_1 a$, содержащая еще один кенотрон K_1 и конденсатор C_1 . В действии этой части разобратся значительно легче: она представляет собой как бы ловушку для положительных зарядов. Кенотрон K_1 может пропускать ток только от c_1 к d ; следовательно, в течение первого полупериода он пропускает заряды, текущие на обкладку d_1 , в виду чего конденсатор C_1 заряжается до $+V_0$; однако, как только V_c начинает спадать, кенотрон не дает разряжаться конденсатору, „вентиль закрыт“, и точка d_1 сохраняет потенциал $+V_0$ до тех пор, пока (см. кривую 4) V_c не превысит $+V_0$. Тогда кенотрон опять пропускает ток, подзаряжающий конденсатор C_1 до $+2V_0$, и этот потенциал остается неизменным теоретически произвольно долгое время, а практически, так как в конденсаторе существуют утечки, а, кроме того, с его обкладок берется ток во внешнюю цепь (например, для питания разрядной трубки), несколько снижается до следующего периода, когда он вновь подзаряжается через K_1 и т. д. ¹⁾

Чем меньше ток, снимаемый во внешнюю цепь, чем больше емкость конденсаторов, тем ближе действительное напряжение обкладки d_1 (пунктирная кривая) к идеальному постоянству (сплошная кривая 4).

Нетрудно видеть, что во время работы схемы на один из кенотронов K_1 ложится разность потенциалов, достигающая $2V_0$. В этом можно убедиться, вычисляя или строя разность потенциалов точек c и d с помощью кривых 3 и 4 (рис. 61). Следовательно максимальное постоянное напряжение, которое может быть получено от такой установки, ограничивается предельным рабочим напряжением кенотрона, составляющим около 220 000 вольт.

Однако, к счастью, такая схема таит в себе возможности дальнейшего повышения напряжения. В самом деле, пристроив такую же схему между точками c и d , между которыми, как нетрудно видеть из рис. 61, действует переменное напряжение, мы получим новую ячейку дающую $2V_0$, включенную последовательно с первой (рис. 62), другими словами, между точками a и f будем иметь постоянное напряжение, равное $4V_0$.

¹ Кривая (4) изображает потенциал точки d для того случая, когда емкость C_1 много меньше C . Если эти емкости примерно одинаковы, то напряжение будет возрастать от 0 до $+2V_0$ не за один период, а в течение нескольких периодов, лишь постепенно приближаясь к $2V_0$.

Например, при $C_1 = C$, в конце первого периода $V_d = 0,5 V_0$, в конце второго периода $V_d = V_0$, в конце третьего периода $V_d = 1,5 V_0$, в конце четвертого $V_d = 1,75 V_0$ и т. д.

Не разбирая в деталях действия этой установки, так как она совершенно аналогична схеме удвоения, можно указать, что подобным образом могут быть построены схемы, позволяющие произвести ушестерение, увосьмерение и т. д. максимального напряжения трансформатора. Вместе с тем нужно отметить, что увеличение напряжения установки путем добавления все новых и новых звеньев хотя и представляется весьма заманчивым способом получения сколь угодно высоких напряжений, на практике используется редко, так как с увеличением числа звеньев уменьшается тот ток, который можно снять с установки, не вызывая значительного падения напряжения. Много выгоднее повышать рабочее напряжение каждого звена, однако это увеличение связано с разработкой конструкции конденсаторов и кенотронов, которые должны выдерживать полное напряжение каждого звена, т. е. $2V_0$, где V_0 — максимальное напряжение трансформатора.

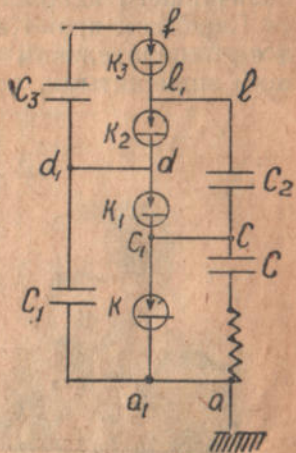


Рис. 62

Успех Кокрофта и Уолтона, которые добились расщепления ядер ряда легких элементов с помощью протонов, ускоренных в разрядной трубке, питавшейся от схемы учетверения по Грейнахеру, обусловлен в значительной степени удачным разрешением проблемы построения кенотронов, свободно запирающих до 400 000 вольт.

VII. ЯДРА ПОД ОБСТРЕЛОМ ПРОТОНОВ

Опыты Кокрофта и Уолтона

— Еще в 1929 г. в лаборатории Резерфорда в Кембридже, которая в течение многих лет являлась ведущей в вопросе исследования атомного ядра, были начаты опыты, конечной целью которых было исследование атомных ядер путем бомбардировки мощным пучком протонов, ускоренных в разрядной трубке, питающейся источником постоянного высокого напряжения. После ряда неудач и преодоления крупнейших технических затруднений в мае 1932 г. появилась короткая заметка, которая оповестила весь мир о грандиозной победе, одержанной молодыми учеными Кокрофтом и Уолтоном.

Им удалось установить „искусственный α -распад“ ядер лития¹ под действием протонной бомбардировки, т. е. впервые разрушить ядро протоном.

¹ Элемент литий, третий в периодической системе, принадлежит к немногим легким элементам, ядра которых не удалось разрушить бомбардировкой α -частицами.

К сожалению, объем книжки не позволяет остановиться на описании трудного пути, пройденного этими учеными, — пути необыкновенно поучительного и содержательного, на котором встречались, на первый взгляд, непреодолимые технические трудности, преодоленные однако неукротимой энергией и удивительной изобретательностью исследователей под руководством величайшего ядерного специалиста Резерфорда.

Перейдем прямо к описанию установки Кокрофта и Уолтона в ее окончательном виде, а затем к проведенным на ней, ставшим знаменитыми, опытам.



Рис. 63

Кенотроны Кокрофта и Уолтона

Решив воспользоваться в качестве источника постоянного напряжения умножающей установкой по принципу Грейнахера, Кокрофт и Уолтон,¹ располагая конденсаторами на 400 000 вольт, изготовленными по специальному заказу одной из германских

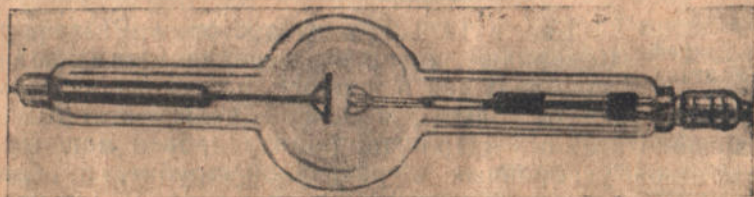


Рис. 64

фирм, решили довести рабочее напряжение кенотронов до 400 000 вольт, с тем чтобы получить постоянное напряжение до 800 000 вольт с установки, выполненной по схеме учетверения. В результате продолжительных опытов была разработана конструкция кенотронов, по своему техническому оформлению резко отличная от имеющих широкое распространение в лабораториях кенотронов

¹ На рис. 63 (слева направо) изображены Уолтон, Резерфорд и Кокрофт.

в виде тонкостенных стеклянных баллонов со впаянными в от-
ростки электродами (рис. 64).

Все четыре кенотрона в схеме (рис. 62) были соединены в
одну „кенотронную башню“, составленную из четырех толсто-
стенных стеклянных цилиндров, каждый длиной около 90 см и
диаметром в 35 см.

Между этими цилиндрами были проложены пластины из
луженого железа *A* (рис. 65) в форме квадратов со стороной
около 90 см; на этих пла-
стинах крепились внутри
трубы электроды *B*, кото-
рые, как и пластины, слу-
жили для создания воз-
можно более равномерного
падения потенциала вдоль
трубки. Верх и низ колон-
ны были накрыты солид-
ными металлическими пли-
тами. Электроды были из-
готовлены из тонкостен-
ной стальной трубы, и к
ним были приделаны тол-
стые кольца *C* из круглой
стали диаметром в $\frac{3}{4}$ дюй-
ма, которые служили для
предотвращения прежде-
временного разряда в кенот-
ронах, вызванного „холод-
ным испусканием“. ¹ Эти
кольца перед установкой
в башню тщательно обез-
жировались. Внутри элек-
тродов *B* находились воль-
фрамовые проволочки в
форме буквы *V*, которые
могли накаливаться током,
проводничок, пропущенный
через небольшие отверстия,
просверленные в стенке цилиндра.

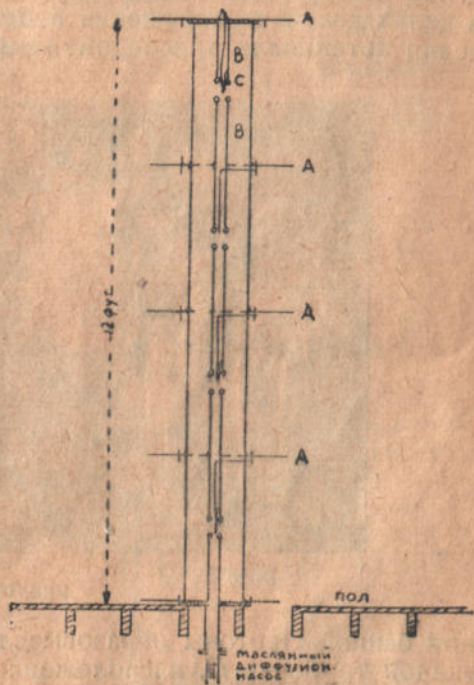


Рис. 65

Эти катоды накаливались от шестивольтовых аккумулятор-
ных батарей, смонтированных в закругленные металлические
ящики, установленные на конденсаторах, которые имели форму
колонок (рис. 66).

Все кенотронная колонна находилась под непрерывной от-
качкой с помощью мощного диффузионного насоса, который
для экономии места был расположен в нижнем этаже здания
(под колонной). Контрольные измерения напряжения, даваемого

1) См. описание трубки Лауритсена в предыдущей главе.

установкой, производились с помощью шарового разрядника с шаром диаметром в 75 см, который можно видеть на том же рис. 66.

Трубка Трубка была смонтирована из двух стеклянных цилиндров, подобных тем, которые были использованы при построении кенотронной башни. Схематически ее разрез представлен на рис. 67. Между цилиндрами была помещена стальная пластина *A*, к которой внутри трубки был приделан электрод *B*, а снаружи — экран из листового металла, в целях деления напряжения и более равномерного распределения потенциала присоединенный к средней точке кенотрон-

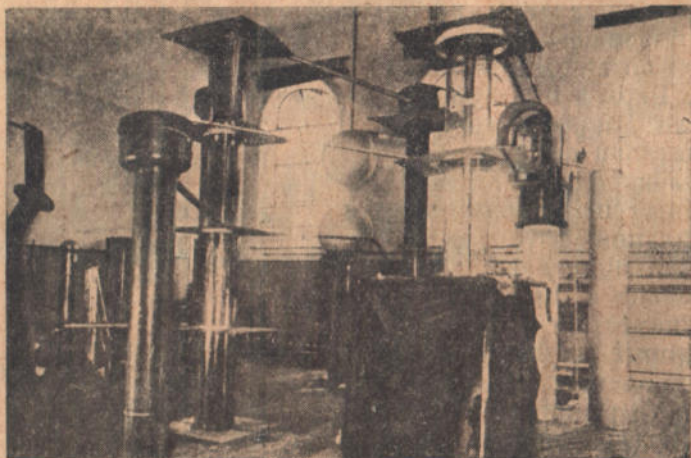


Рис. 66

ной башни. Протоны образовывались во вспомогательной разрядной трубке *D*, расположенной сверху основной, „ускоряющей“ трубки. Для образования в *D* достаточно интенсивного разряда необходимо было, во-первых, приложить к этой трубке напряжение около сорока тысяч вольт, во-вторых — создать в ней давление водорода примерно около тысячной миллиметра, в то время, как в главной трубке должен быть возможно более совершенный вакуум для того, чтобы протоны могли свободно ускоряться, не растрчивая своей энергии на столкновения с атомами. Последнему условию удалось удовлетворить довольно легко, вставив на пути из вспомогательной в главную трубку узкий металлический канал.

Напуская через специальный вентиль в верхнюю трубку в небольшом количестве водород и в то же время с возможно большей мощностью откачивая главную трубку, Кокрофту и Уолтону довольно легко удалось создать надлежащие условия для интенсивного образования протонов в „верхнем отделении“

и достаточно, беспрепятственного ускорения их в главной трубке.

Сложнее обстояло дело с питанием вспомогательной трубочки. Затруднение заключалось в том, что источник напряжения для нее сам должен находиться под полным напряжением установки, так как протонная трубочка присажена на высоковольтном конце трубки. Эта задача была разрешена следующим весьма остроумным способом.

Отдельная небольшая установочка, состоящая из трансформатора и кенотрона, была расположена на изоляционной колонне, рассчитанной на полное напряжение главной установки. Эта установочка питала трубку, в которой образовывались протоны, а ее трансформатор питался от специальной небольшой динамомшины, установленной на той же колонне; мотор же вращавший ее с помощью длинного ремня (тоже рассчитанного на полное напряжение установки), находился на полу и непосредственно включался в сеть. Общий вид установки представлен схематически на рис. 68, а ее фотография на рис. 66.

Образовавшиеся при разряде во вспомогательной трубке протоны проходят сквозь металлический канал, ведущий в главную трубку, и ускоряются там электрическим полем между верхним и средним, а затем между средним и нижним электродами, после чего через медную трубку диаметром около 7,5 см они попадают в нижнюю часть прибора, которая и может служить непосредственно для эксперимента. Измерения протонного тока, проинтегрированного в нижнюю часть прибора, показали, что при данной конструкции трубки можно достигнуть протонного тока до одной стотысячной ампера (т. е. в десять тысяч раз большего чем, например, в установке Лауренса).

Попадание протонов в нижнюю часть можно заметить также, помещая внутри трубки экран из сернистого цинка или виллемита, светящийся под действием протонной бомбардировки.

Первый пуск такой установки требует довольно большого времени и тщательности. Как только к трубке прикладывается

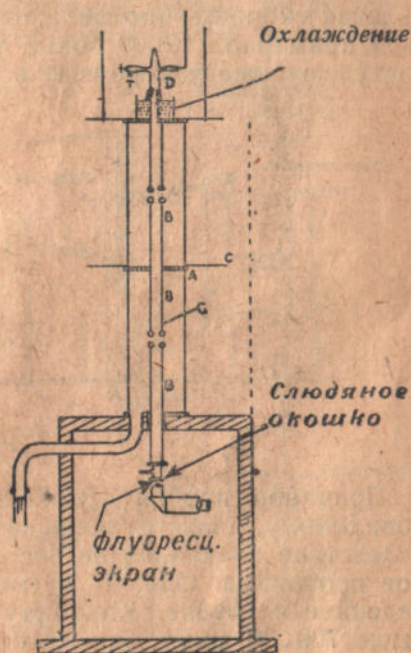


Рис. 67

напряжение, под действием электронной бомбардировки из металлических частей вырывается громадное количество газа. Прикладывая на несколько секунд все повышающееся напряжение, можно постепенно „оттренировать“ трубку. Эта операция для вновь собранной трубки продолжается полный день, но раз оттренированная трубка может быть пущена в ход не больше чем за полчаса.

Полное напряжение установки Кокрофту и Уолтону к трубке так и не удалось подвести, так как при 690 000 вольт неизменно пробивался нижний стеклянный цилиндр трубки. Максимальная скорость протонов, полученная при этом, соответствовала примерно 710 000 вольт, так как в главную трубку протоны поступают уже ускоренные в трубке *D*.

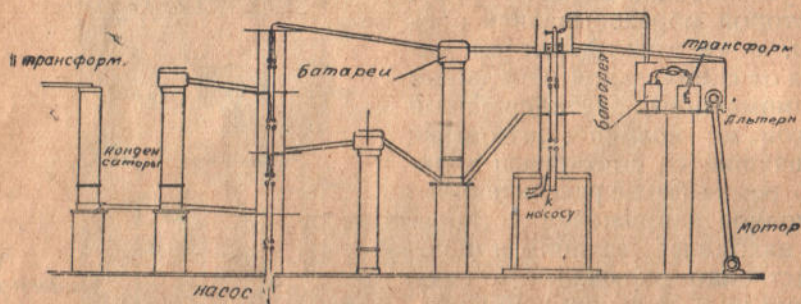


Рис. 68

Причиной пробыя стеклянного цилиндра основной трубки, повидимому, является зарядка внутренней стенки последнего вследствие налипания на нее электронов, выбитых из электродов протонами. Однако, несмотря на то, что напряжение, подведенное к трубке, Кокрофту и Уолтону не удалось поднять выше 700 000 вольт, все же они решили подвергнуть бомбардировке полученными протонами ряд легких элементов.

Исхода этих опытов можно было ожидать с некоторой надеждой, так как хотя и было известно, что α -частицы разрушают ядра, обладая скоростью, соответствующей не менее 3 млн вольт, однако, согласно теории Гамова, можно было рассчитывать, что частицы с вчетверо меньшей массой и вдвое меньшим зарядом смогут проникнуть внутрь ядра значительно легче, т. е. обладая меньшей энергией. Действительность не только подкрепила эти надежды, но разрушающая способность протонов оказалась превосходящей всякие ожидания.

Первым был подвергнут протонной бомбардировке литий. К нижнему концу медной 7,5-сантиметровой трубы, которой заканчивалась главная разрядная трубка, было прилеплено донышко, на котором с помощью пропущенного через него штифтика укреплялся

Разрушение
ядер лития

экран, покрытый слоем лития *A* (рис. 69). Экран был поставлен под углом 45° к направлению падающих протонов, а в стенке трубки против него было проделано отверстие, заделанное тонкой слюдяной пластинкой *B*, на которой был нанесен слой сернистого цинка поверхностью внутрь трубки и которую можно было наблюдать в микроскоп. На пути между экраном и слоем сернистого цинка была помещена вторая слюдяная пластинка *C* толщиной около пяти тысячных миллиметра. Ее назначением было предохранить этот слой от попадания протонов, рассеянных при ударе об литий. Когда к трубке было приложено около 125 000 вольт, при протонном токе в одну миллионную ампера, в микроскоп стали наблюдаться яркие сцинтилляции примерно раз 5 в минуту. При выключении напряжения сцинтилляции исчезли. При дальнейшем увеличении подведенного к трубке напряжения их число резко увеличивалось.

По виду сцинтилляций можно было предположить, что причиной их являются удары α -частиц. Первое, что было проделано для изучения природы этих частиц, это измерение их пробега. Вставляя между литиевым экраном и слоем сернистого цинка листочки слюды, Кокрофт и Уолтон легко установили, что пробег частиц, вызывающих сцинтилляцию, в пересчете на воздух

несколько превышает восемь сантиметров. Тем самым были устранены возможные подозрения в том, что причиной сцинтилляций могли бы быть рассеянные экраном протоны. При максимальной скорости протонов, достигнутой Кокрофтом и Уолтоном, их пробег в воздухе не превышал одного сантиметра.

В том, что ускоренные в трубке протоны не являются непосредственной причиной сцинтилляций, окончательно убедило то обстоятельство, что пробег вызывающих сцинтилляций частиц не зависит от напряжения, приложенного к трубке.

После этих опытов стало почти очевидным, что при бомбардировке лития протонами наблюдается выбивание α -частиц с громадной энергией, намного превышающей энергию падающих протонов. Однако, прежде чем сделать это решающее заключение, исследователи поставили еще два опыта, которые оконча-

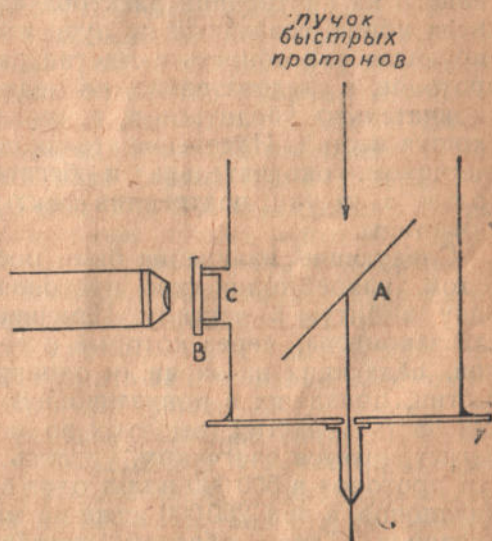


Рис. 69

тельно убедили в том, что причиной сцинцилляций являются α -частицы.

Прежде всего, вместо окошка с сернистым цинком, трубка была заделана чистой пластинкой и присоединена к камере Уильсона. Как только к трубке было приложено напряжение, в камере было замечено множество путей, по виду совершенно подобных путям α -частиц. После этого камера Уильсона была заменена ионизационной камерой с электрическим счетчиком, снабженным осциллографом,¹ так что попадание каждой частицы регистрировалось отбросом зеркала, записанным на фотопленке. Величина отброса служит мерой заряда, перенесенного на внутренний электрод камеры, а, следовательно, и числа ионов, созданных на пути частицы внутри камеры. Ионизирующая способность α -частиц раза в четыре больше, чем у протонов, а следовательно, по величине толчков можно было окончательно убедиться в природе вылетающих из бокового окошка частиц. Измерение толчков тока, зарегистрированных счетчиком, окончательно и бесповоротно решило вопрос в пользу α -частиц, подтвердив факт расщепления ядер лития на α -частицы.

Следующие измерения были посвящены выяснению вопроса о том, какое количество протонов приходится в среднем на одну выбитую α -частицу. Измеряя протонный ток с помощью гальванометра, через который отводился к земле заряд протонов, падающих на экран, и одновременно определяя число α -частиц, попавших в ионизационную камеру, с учетом того, какая часть α -частиц, выбитых во всевозможных направлениях, регистрируется счетчиком, удалось установить, что при скорости протонов в 500 000 вольт одна α -частица выбивается на сто миллионов, а при 250 000 даже на миллиард попавших на экран протонов. Таким образом, громадное большинство упавших протонов пропадает „впустую“, и только ничтожная часть вызывает расщепление ядра лития.

Толкование результатов бомбардировки лития

Однако, несмотря на то, что удачные попадания при бомбардировке протонами необычайно редки (значительно реже, чем при бомбардировке α -частицами), каждое такое удачное попадание интересно тем, что высвобождает огромную порцию внутриядерной энергии.

В самом деле, протоны в 125 000 вольт уже производят разрушение лития. Можно было думать, что это разрушение идет таким образом: литий с атомным весом 7 захватывает попавший в ядро протон, и вслед за тем образовавшееся неустойчивое ядро с атомным весом 8 разрывается на две α -частицы, разлетающиеся с громадной скоростью в противоположные стороны. Пробег α -частиц около 8,5 см, откуда можно оценить их

¹ О счетчиках α и H -частиц говорилось в главе четвертой.

энергию приблизительно в 8,6 млн вольт. Если предположенно представление о процессе распада ядра лития под ударом протона правильно, то две α -частицы, выброшенные из ядра, обладают вместе энергией в 17,2 млн вольт, от которой энергия падающего протона составляет менее одного процента.

С таким значительным „выигрышем“¹ энергии при разрушении ядер в проделанных до Кокрофта и Уолтона опытах по разрушению ядер α -бомбардировкой встречаться не приходилось.

При разрушении ядер алюминия ударами α -частиц, правда, также наблюдается некоторый выигрыш энергии, но он не превышает 10-15%, тогда как здесь мы имели выигрыш в 10 000%.

Вслед за опубликованием исследования Кокрофта и Уолтона в печати появилось несколько работ, сообщающих о дезинтеграции лития и других легких элементов ударами протонов. Среди этих статей, помимо работ Лауренса и Браша и Ланге, ценных своей методикой, описанной в начале настоящей главы, интересны исследования Олифанта (лаборатория Резерфорда) и Рауш фон - Траубенберга (Германия). Оба исследователя пользовались значительно более мощным пучком протонов, обладающих значительно меньшими скоростями чем у Кокрофта и Уолтона. Так, Траубенберг наблюдал расщепление ядер лития протонами со скоростью всего 13 000 вольт.

Изложенное представление о процессе разрушения ядер лития протонами можно было проверить на основании следующих соображений. Масса ядра лития определена измерениями с помощью масс-спектрографа с большой степенью точности. Точно так же известны массы как протона, так и α -частиц. Таким образом, можно было проверить, составив суммарную массу частиц до (протонов, литий) и после (α -частицы) столкновения, заметно ли уменьшение массы в результате освобождения внутриядерной энергии, и если да, то какому количеству освобожденной энергии это уменьшение соответствует. Этот подсчет был выполнен, и было показано, что, действительно, сумма атомных весов двух α -частиц примерно на 0,012—0,018 меньше суммы весов протона и ядра лития. Это уменьшение массы при превращении ядра лития и протона в две α -частицы соответствует выделению энергии в 12—17 млн вольт, что хорошо согласуется цифрой 17,2 млн, представляющей сумму энергий α -частиц, измеренных на опыте по длине пробега.

Однако исследователи поставили еще один опыт в подтверждение своих взглядов на процесс распада ядра лития при ударе протона. Идея его заключалась в следующем. Если при распаде ядра лития испускается одновременно две α -частицы, то поместив тончайший слой лития (который бы легко пропу-

¹ Выражение „выигрыш энергии“ не следует понимать как появление энергии из ничего. Как мы увидим в дальнейшем, выделение внутриатомной энергии сопровождается соответствующим изменением массы.

скан α -частицы) под углом в 45° к пучку протонов и наблюдая сцинтилляции в два микроскопа, расположенные по обе стороны от экрана, можно было бы ожидать большого количества одновременных сцинтилляций, вызванных ударом о сернистый цинк α -частиц, выброшенных из одного и того же ядра в противоположные стороны.

Опыт был поставлен таким образом (рис. 70). Два экспериментатора наблюдали, сцинтилляции в микроскопы А и В. У каждого из них было под рукой по телеграфному ключу, нажатием на который наблюдатель немедленно реагировал на появление каждой сцинтилляции. Нажатие каждого из ключей регистрировалось на движущейся бумажной ленте, рассматривая которую нетрудно было установить одновременность сцинтилляций. В камере, где находились наблюдатели, был установлен пищик, шум которого заглушал звук ключей, так что ни один из наблюдателей не мог ни слышать, ни видеть, когда другой заметил сцинтилляцию.

Таким образом возможность подсознательной "обработки" результатов во время самого опыта была полностью исключена.

Рассмотрение ленты с "записью" наблюдений обоих экспериментаторов показало значительное количество одновременных сцинтилляций и притом чрезвычайно близкое к тому, которое можно было ожидать, учитывая не совсем симметричное расположение экранов с сернистым цинком, а также и то, что не все α -частицы, попадающие на них, вызывают сцинтилляции.

Этот опыт дал основательное подтверждение изложенному представлению о разрушении ядер, согласно которому распад сопровождается одновременным испусканием двух α -частиц со скоростями, одинаковыми по величине, но противоположными по направлению.

Предварительные исследования были проделаны, кроме лития, еще для 16 других элементов. Для всех этих элементов (бериллий, бор, углерод, кислород, фтор, натрий, алюминий, калий, кальций, железо, кобальт, никкель, медь, серебро, свинец и уран) под действием протонной бомбардировки наблюдались на экране яркие сцинтилляции, повидимому вызванные выбрасыванием из ядер α -частиц под действием удара протона. Однако для лития, бора и фтора число частиц было чрезвычайно большим, для бериллия же, углерода, алюминия, кальция, кобальта, никкеля, меди, серебра и урана значительно меньшим, но все же

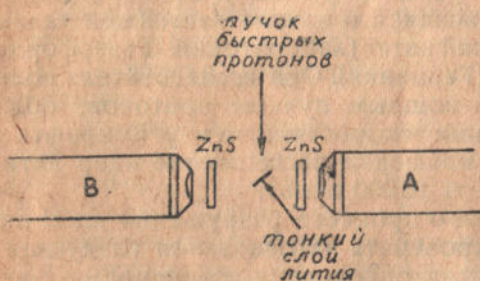


Рис. 70

Разрушение ядер других элементов

кальций, железо, кобальт, никкель, медь, серебро, свинец и уран) под действием протонной бомбардировки наблюдались на экране яркие сцинтилляции, повидимому вызванные выбрасыванием из ядер α -частиц под действием удара протона. Однако для лития, бора и фтора число частиц было чрезвычайно большим, для бериллия же, углерода, алюминия, кальция, кобальта, никкеля, меди, серебра и урана значительно меньшим, но все же

достаточно значительным; для натрия и свинца, а особенно для кислорода, калия и железа оно было настолько малым, что можно было заподозрить выбивание α -частиц из ядер не этих элементов, а каких-либо содержащихся в них в незначительных количествах примесей.¹

Для большинства из исследованных веществ были измерены пробеги α -частиц, по ним была вычислена энергия и полученная величина (для элементов, атомный вес которых известен достаточно точно) была сопоставлена с определенной из убыли массы. Во всех случаях этот подсчет давал хорошее совпадение вычисленных величин с наблюдаемыми, чем подтверждается правильность тех представлений о характере распада, о которых мы говорили выше.

Наибольший выход ядерной энергии был все же у лития. Пробеги частиц, выбитых из других ядер, значительно меньше, чем в случае лития, и не превышают 3,5 см.

Опубликованные результаты опытов Кокрофта и Уолтона над элементами, кроме лития, носят еще предварительный ориентировочный характер. На основании их еще нельзя строить обобщений или окончательных заключений о процессе распада ядер исследованных элементов. Однако при рассмотрении этих результатов невольно бросается в глаза то обстоятельство, что атомные веса для трех элементов: лития, бора и фтора, дающих наибольшие количества α -частиц при бомбардировке протонами, при делении на четыре дают в остатке три, в силу чего можно предположить, что их ядра состоят из α -частиц и трех „оставшихся за бортом“ протонов. Сравнение атомных весов с атомными номерами показывает, что кроме этих трех протонов остаются еще лишние, не вошедшие в число α -частиц, два электрона. Таким образом, представляется чрезвычайно вероятным, что влетевший в ядро протон дополняет „избыточные“ три протона и два электрона до α -частицы, которая и выбрасывается из ядра.

О том, как происходит разрушение ядер у атомов других типов, на основании имеющихся данных говорить пока нельзя. Позднейшие исследования Кокрофта и Уолтона, Лауренса, Рауш фон Траубенберга и других исследователей показывают, что расщепление одних и тех же ядер протонами сопровождается испусканием нескольких групп α -частиц с разной энергией. Вероятно, избыток энергии, остающейся в ядре при вылете более медленной α -частицы, испускается в виде γ -лучей, наличие которых в случае расщепления лития уже доказано.

Все эти вопросы наряду с объяснением на первый взгляд чрезвычайно мало вероятного факта разрушения ядер с таким огромным зарядом, как у урана и свинца, ядер к которым, казалось бы, протон, обладающий „жалкой“ скоростью в пару

¹ В частности, испускание α -частиц ураном и свинцом под действием протонной бомбардировки, повидимому, объясняется примесью бора.

сотен тысяч вольт, не может и приблизиться, — должны быть разрешены дальнейшими исследованиями.

Опыты Кокрофта и Уолтона, которыми впервые установлен новый тип разрушения ядра (поглощение протона с испусканием α -частицы), обратный Резерфордскому захвату α -частицы с испусканием протона, открывают новую страницу в исследовании ядерной проблемы. Созданная ими протонная пушка показала, что для разрушения ряда ядер протонами достаточно неожиданно небольших напряжений, начиная с нескольких десятков тысяч вольт, напряжений, которыми располагает почти каждая физическая лаборатория.

Нельзя конечно думать, что этими опытами устраняется потребность в источниках более высоких напряжений для целей исследования ядер. Этих источников без сомнения потребует исследование ядер, не вошедших в список семнадцати, исследованных этими учеными и тех элементов (как кислород, железо и калий), в которых разрушения ядер протонами со скоростью до 700 000 вольт настолько редки, что появление сцинтилляций может быть объяснено наличием примесей. Словом, описанные опыты только открыли новую лазейку в тайники атомного ядра, дав в руки экспериментаторам новое мощное средство для его исследования. Многие проблемы стали значительно более доступными, многие загадки ждут своего разрешения. Новая победа Кавендишской лаборатории еще раз подчеркивает необходимость настойчивой работы в области исследования ядра, исследования, в котором шаг за шагом отвоевывает почетное место молодая советская лаборатория Украинского физико-технического института, о работе которой будет идти речь в следующей главе.

VIII. РАБОТА УФТИ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДРА

УФТИ — институт молодой. 1 сентября 1930 г. была закончена внутренняя отделка здания, и институт вступил в свой пусковой период. Освоение помещения и установка оборудования была в основном закончена в течение первого полугодия работы. В это же время группа сотрудников УФТИ приступила к исследовательской работе в области ядра, начав с разработки метода ускорения частиц с помощью трансформатора Тесла. Эта группа образовала бригаду трансформатора Тесла. Через год, в сентябре 1931 г. группа работников высоковольтной лаборатории выросла в сильную научную бригаду и выдвинула в качестве основной темы своей дальнейшей работы исследование атомного ядра, — проблему, которая стала на протяжении последующего периода работы института и остается и по настоящее время одним из основных стержневых вопросов, разрабатываемых в институте.

Сознавая всю трудность и ответственность взятой задачи, УФТИ усилил качественно и количественно состав ядерных бригад, благодаря чему оказалось возможным вести работу сразу по нескольким направлениям, пользуясь различными методами ускорения ионов и разрабатывая различные типы разрядных трубок.

В результате ударной работы ядерная группа УФТИ (бригады трансформатора Тесла и высоковольтная) добились к осени 1932 г. крупных успехов в исследовании ядра, которые сводятся к овладению техникой построения источников высокого напряжения, введению его в вакуум и изучению результатов бомбардировки атомных ядер быстрыми протонами.

Создана техническая база, на основе которой представляется возможным развернуть широкое исследование физических свойств различных атомных ядер в масштабе, не уступающем передовым лабораториям Запада и Америки.

Нашей задачей является освещение основных этапов работы ядерных бригад УФТИ, подытоживание их успехов и неудач и, наконец, обсуждение тех перспектив, которые открываются на данном этапе работы.

Работа с импульсным генератором

Первой технической задачей, которую представлялось необходимым разрешить, было создание источника высокого напряжения для ускорения ионов. Наиболее простым путем для до-

стижения весьма высоких напряжений, превышающих миллион вольт, является метод трансформатора Тесла и ударного генератора. Эти два пути и были выбраны работниками УФТИ. Работа с импульсным генератором, которой мы коснемся в первую очередь, отступая от исторической последовательности, в самом начале сводилась к изготовлению высоковольтных конденсаторов, которые являются основной частью ударной схемы.

После ряда предварительных опытов был построен импульсный генератор, общий вид которого изображен на рис. 71. Он представляет собою деревянную конструкцию, на которой установлены 36 конденсаторов.

Каждый конденсатор — лист стекла размером около 1 м^2 , толщиной от 2,5 до 3,5 мм, оклеенный с обеих сторон оловянной бумагой (станиолом). Конденсаторы включены параллельно через сопротивления, которые выполнены в виде стеклянных U-образных трубок, заполненных жидкостью подходящего сопротивления (различной крепости раствор медного купороса в дистиллированной воде). Меняя состав жидкости в трубках, можно было регулировать продолжительность удара напряжения в пределах от одной десятитысячной до одной миллионной секунды. Между каждой парой конденсаторов были включены шаровые разрядники, расстояния которых можно было регулировать, изменяя таким образом величину напряжения в момент удара. Максимальное напряжение, при котором конденсаторы работали еще достаточно удовлетворительно, было около 40 000

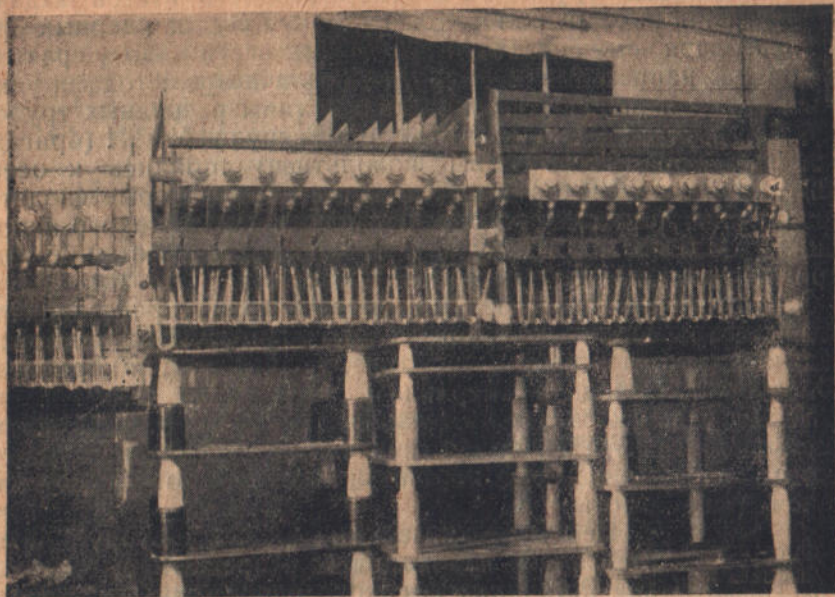


Рис. 71

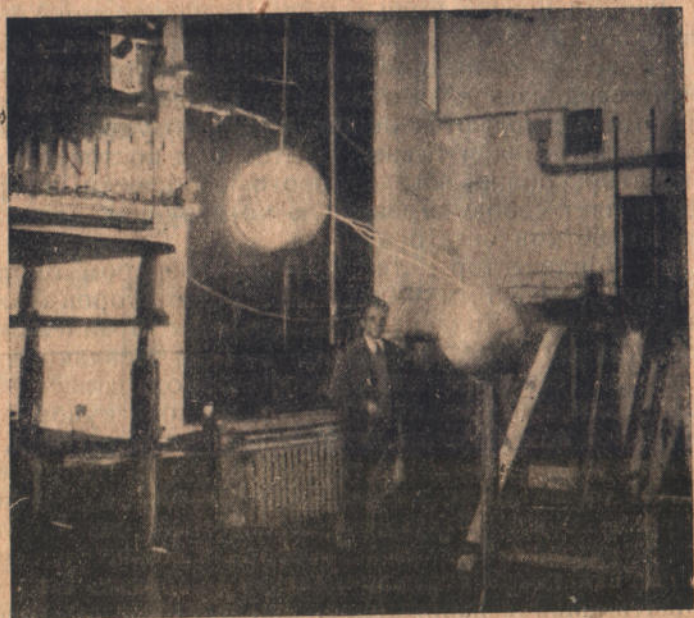


Рис. 72

вольт, благодаря чему в момент удара удавалось получить напряжение до полутора миллионов вольт. Напряжение при ударе измерялось с помощью шарового разрядника по длине искры между шарами диаметром около 50 см, которая при полутора миллионах вольт достигает примерно полутора метров (см. рис. 72). Несмотря на сравнительно малый запас энергии, накапливаемой перед ударом в генераторе (емкость каждого из стеклянных конденсаторов невелика: всего около сотой микрофарады), мощность, развиваемая при ударе, весьма значительна.

При длительности импульса около одной стотысячной секунды (нормальный режим работы генератора) она достигает двадцати тысяч киловатт, благодаря чему разряд между шарами происходит в виде чрезвычайно мощной искры и сопровождается оглушительным треском.

После того как был построен генератор, пришлось перейти ко второй части задачи, оказавшейся значительно более трудной, — к построению соответствующей разрядной трубки. Как уже говорилось в главе

шестой, основным затруднением при создании сверхвысоковольтных разрядных трубок является опасность электрического пробоя стенки трубки, и поэтому усилия работников высоковольтной группы УФТИ были вначале направлены на создание трубки с возможно более прочными в электрическом отношении стенками. Не желая отказываться от стекла в качестве внутренней поверхности трубки, в виду того, что этот материал выделяет при откачке сравнительно мало газов, и, вместе с тем, не имея возможности изготовить достаточно толстостенную стеклянную трубку, пришлось стать на путь „натачивания“ трубки в ширину другими материалами. Так были созданы типы трубок,

Разрядные трубки

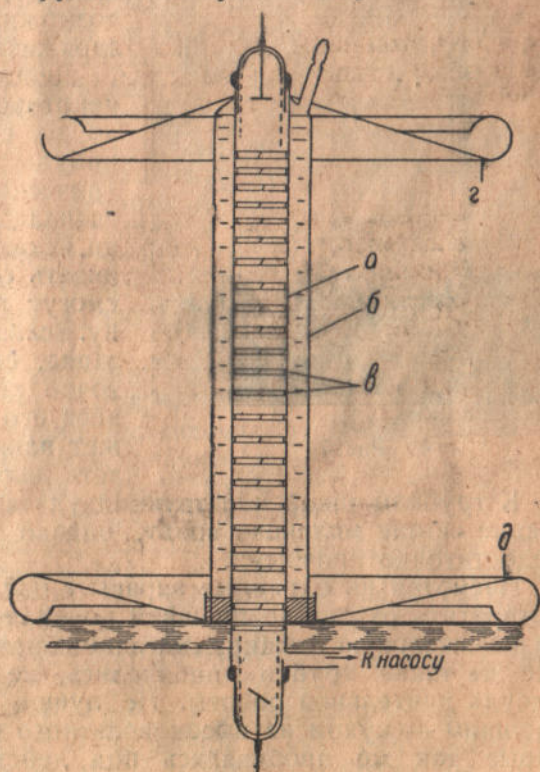


Рис. 73

приведенные на рис. 73, 74 и 75. Принцип этих трубок был в сущности одинаковым и достаточно ясно виден на рис. 73, где схематически представлен разрез трубки, фотография которой приведена на рис. 74.

Стекло́нная трубка *a* помещена в стекляннóй же кожух *b*. Пространство между трубками (около 3 см) заполнено трансформаторным маслом. Таким образом, напряжение при работе трубки в случае зарядки ее стенок ложится на солидную толщину трансформаторного масла.

Назначение пружинящих никкелевых колец *в*, вставленных

внутри трубки, следующее: часть электронов и ионов, пролетающих сквозь длинную трубку *a* (длина свыше полутора метров), садится на ее стенки. При отсутствии колец *в* приставание зарядов к стенке трубки может „запереть трубку“, сделав невозможным пролет дальнейших заряженных частиц.

Действительно, допустим, что некоторое количество ионов село на стенку трубки в какой-нибудь точке. Тем самым электрическое поле, которое было вначале направлено по оси трубки, исказится, ионы будут сворачивать со своего пути и уже не смогут пролететь всю ее длину. Если же вставлены кольца, то заряд, севший в какой-нибудь точке кольца, распределится по всей его поверхности и не окажет влияния на направление полета дальнейших ионов.

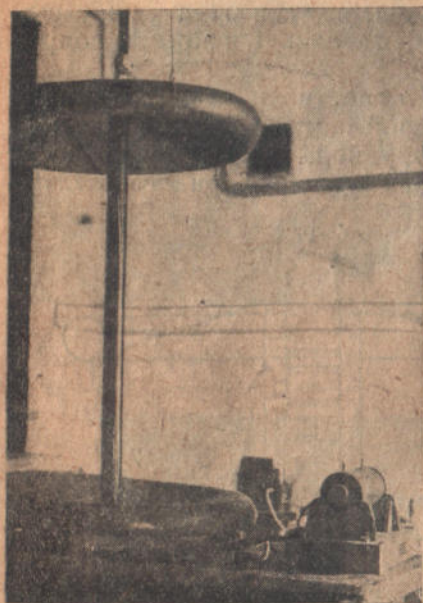


Рис. 74

К трубкам такой конструкции удавалось приложить напряжение свыше миллиона вольт, однако они оказались все же недостаточно прочными.

Несмотря на охранные экраны *г* и *д*, имевшие целью предотвратить разряд по внешней поверхности трубки, несмотря на значительную толщину „масляной брони“, окружавшей трубки, все же такие трубки пробивались, не выдерживая сколько-нибудь длительной работы. Не лучше оказались и трубки с внешним кожухом из высоковольтного фарфора (рис. 75), которые так же пробивались под действием сокрушительных ударов полутора миллионов вольт.

В связи с этим был испробован еще один тип импульсной трубки, который явился последней попыткой сохранить вну-

треннюю часть трубки из стекла — последней данью традициям общепринятой вакуумной техники. Внутреннее устройство этой трубки, вернее колонны, вес которой достигал ста килограмм, представлен на рис. 76. Такого же типа стеклянная трубка с внутренними пружинящими кольцами была сердцем всего сооружения. Новостью явились металлические диски *в*, соединенные с кольцами *г* с помощью проволочек, впаянных в стенку трубки. Назначение их заключалось в том, чтобы предотвратить возможность пробоя стеклянной стенки, устранив самую причину этого пробоя. Ведь металлические диски *в* находятся на *внешней*, а кольца *г* на *внутренней* поверхностях трубки, а так как они соединены проводником, то разность потенциалов между точками внутренней и внешней поверхности могла выравниваться „мирным“ путем, не приводя к пробоям стенки.

Кроме того, стеклянная трубка *а* вместе с дисками *в* была заделана в массивное тело из компаунда (изоляционной смеси) какифоли, парафина, воска и льняного масла. Таким образом, толщина стенки была доведена почти до десяти сантиметров. В тело из компаунда были заложены изоляционные круги из проваренного в парафине картона, которые выступали в виде ребер из тела и удлиняли путь для разряда по внешней стенке трубки. Общий вид трубки с телом из компаунда изображен на рис. 77.

Казалось бы, что при подобной конструкции трубка является неуязвимой, и все же и этот тип не удовлетворил поставленному требованию. Пробои (правда, значительно реже) наблюдались и на такой трубке. Они были, повидимому, связаны с тем, что не удавалось достаточно хорошо отлить тело трубки, в котором при застывании наблюдалась усадка, сопровождавшаяся образованием трещин, пустот, короблением дисков и т. п. Кроме того, эта трубка фактически не могла быть ремонтируема, так как раз отформованное компаундное тело не удавалось вскрыть не разрушив внутреннюю стеклянную трубку.

Потерпев неудачу в построении трубки с внутренней частью, выполненной в виде сплошного стеклянного цилиндра, бригада работников УФТИ была вынуждена перейти к другому типу трубки, конструкция которого была предложена Брашем и Ланге и в основных чертах описана в предыдущей главе (см. рис. 51). Стенка этой

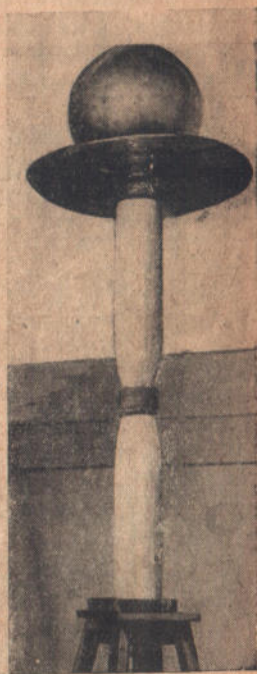


Рис. 75

Блиновидная
трубка

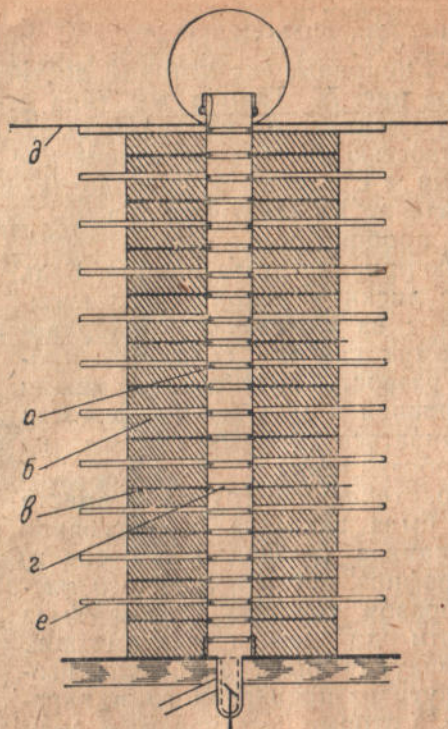


Рис. 76

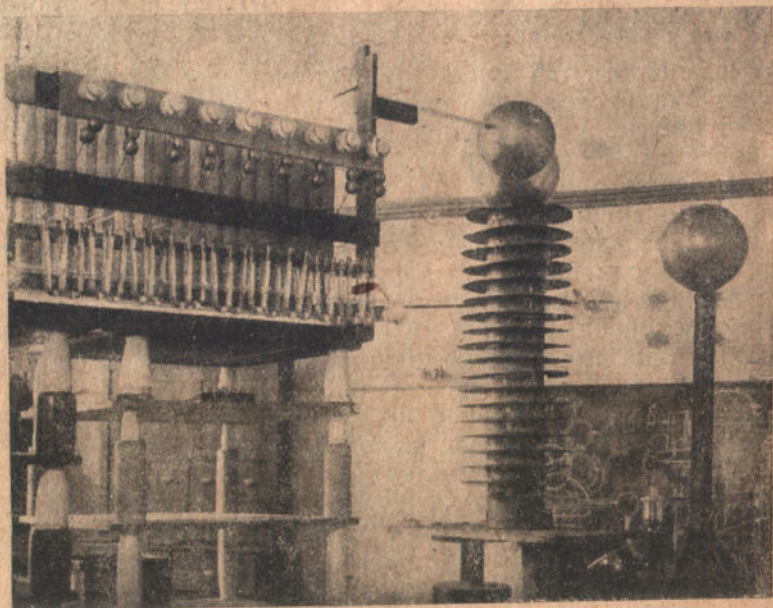


Рис. 77 .

трубки, состоящая из чередующихся шайб (блинов) из стекла, алюминия и резины (рис. 78), является практически непробиваемой, так как проложенные через каждые 5 мм. длины трубки металлические прослойки не допускают образования разности потенциалов между внешней и внутренней стенкой трубки и тем самым предотвращают возможность пробоя.

При осуществлении трубки потребовалось преодолеть большие трудности, связанные с тем, что стенка трубки должна быть совершенно непроницаемой для воздуха. Пришлось подобрать особый сорт резины, достаточно эластичный и обладающий гладкой поверхностью, которая была изготовлена по специальному заказу в ленинградском резиновом комбинате „Красный треугольник“. Поверхность отштампованных из этой резины колец смазывалась перед складыванием трубки специальной вакуумной замазкой. При откачке воздуха из внутренней трубки стопа шайб, составляющих стенку трубки, сдавливалась атмосферным давлением с силой около трехсот килограмм, благодаря чему, после ряда неудач, в трубке удалось достигнуть разрежения в несколько десятитысячных миллиметра ртутного столба.

Изготовленная таким образом из ста шестидесяти комплектов колец стекло-резина-алюминий-резина, трубка длиной около 120 см представлена на рис. 79.



Рис. 78

Эта трубка длительно работала при напряжениях от миллиона до полутора миллионов вольт, при чем не наблюдалось ни одного случая пробоя стенки. Ряд опытов, произведенных с помощью этой трубки, будет описан несколько ниже. Однако в дальнейшем пришлось отказаться от работы с нею и построить другую трубку, основанную на том же принципе, но несколько отличающуюся по конструктивному исполнению.

Оказалось, что отдельные комплекты дисков, из которых была построена трубка, с течением времени медленно скользят друг по другу, при чем трубка постепенно изменяет свою первоначальную форму, искривляется, а стеклянные диски вследствие неравномерной нагрузки начинают трескаться.

Поэтому вторая блиновидная трубка была сделана более жесткой. Изолирующие диски (на этот раз из эбонита) были

переслоены алюминиевыми, как и в первой блиновидной трубке, однако они не переслаивались шайбами из резины, а склеивались особой массой, компаундом, под названием чаттертона, который применяется в электротехнике для изоляционных целей. Этот компаунд, достаточно жидкий в горячем виде, при охлаждении застывает, так что эта трубка уже не изменяла своей формы с

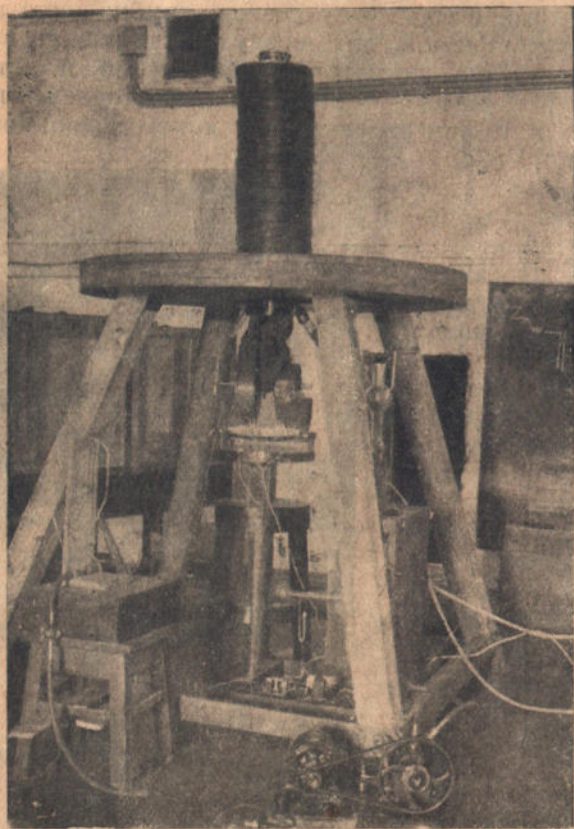


Рис. 79

течением времени оказалась более пригодной, чем первая конструкция со стертыми дисками. После опыты с импульсными трубками ясно, что разрядные трубки блиновидного типа выдерживают приложенные к ним удары высокого (до 1,5 млн. напряжения, перешли к опытам с ускорением в этих трубках заряженных частиц. Прежде всего была поставлена серия опытов с быстрыми электронами. Для этого к верхней плите трубки приклеивалось ударно-напряженное отрицательного знака, так что электроны ускорялись в трубке в направлении сверху вниз. На своем пути они встречали металлическую пластинку, которой был закрыт флянец массивного медного круга на котором крепилась вся стопа дисков. При своем торможении в массивном металле электроны теряют свою энергию, которая частично выделяется в виде тепла в пластинке, а часть излучается в виде рентгеновых лучей. При бомбардировке стопа быстрыми электронами поверхность пластинки своеобразно разрушается.

Электроны, проникая в металл довольно глубоко (на несколько десятых миллиметра), теряют значительное количество

течением времени оказалась более пригодной, чем первая конструкция со стертыми дисками.

После опыты с импульсными трубками ясно,

что разрядные трубки блиновидного типа выдерживают приложенные к ним удары высокого (до 1,5 млн. напряжения, перешли к опытам с ускорением в этих трубках заряженных частиц. Прежде всего была поставлена серия опытов с быстрыми электронами. Для этого к верхней плите трубки приклеивалось ударно-напряженное отрицательного знака, так что электроны ускорялись в трубке в направлении сверху

своей энергии, вызывая местный разогрев, в результате которого металл в очень небольшой области испаряется, что сопровождается образованием пузырьков, которые иногда разрываются внутрь трубки. При этом на поверхности металла, подвергнутого электрической бомбардировке, образуются небольшие углубления, окруженные разорванным краем.

Рентгеновы лучи, испусканием которых сопровождается торможение электронов в металлической крышке, при скоростях электронов, измеряемых полутора миллионами вольт, обладают очень малой длиной волны, а следовательно, громадной проникающей способностью. Они свободно проникают сквозь слой свинца толщиной в несколько сантиметров, в то время как надежной защитой от лучей обычных рентгеновских трубок, применяемых в медицине, а также для исследования металлов в заводских лабораториях считаются свинцовые экраны, толщина которых не превышает пяти—шести миллиметров.

Электроны, ускоренные в разрядной трубке, могут быть выпущены в атмосферу через окошко в металлической пластинке, закрывающей нижний фланец трубки. Это окошко, разумеется, было закрыто более тонким слоем металла (обычно применялась алюминиевая фольга толщиной в 0,01 мм). Мощный пучок электронов, вырывающийся из такого окошка, довольно быстро рассеивается в воздухе в результате столкновения электронов с электронными оболочками атомов атмосферных газов. В силу этого свечение экрана, покрытого платино-синеродистым барием, вызываемое ударами быстрых электронов, довольно быстро ослабевает по мере удаления от окошка; однако с уверенностью можно сказать, что пробег электронов (при напряжении в 1,5 млн вольт) превышает полтора метра. Даже в твердой среде пробег этих электронов довольно значителен, достигая, например, для алюминия приблизительно полутора миллиметров.

В некоторых твердых материалах быстрые электроны вызывают кратковременные или длительные изменения строения. Обычно сопровождаемые ярким свечением. Так, например, известковый шпат (углекислый кальций) светится кроваво-красным светом, притом не только в момент электронной бомбардировки, но и в течение нескольких минут по ее окончании. Кристаллы поваренной соли, в которые электроны проникали на глубину около одного миллиметра, в момент бомбардировки испускают яркое зеленоватое свечение, а в слое, куда проникают электроны, наблюдается изменение окраски, сохраняющееся (при хранении кристаллов в темноте) в течение нескольких месяцев. Окраска, при небольшой длительности электронной бомбардировки (в наших условиях 5—10 ударов напряжения) — лимонно-желтая, при дальнейшей бомбардировке темнеет, достигая буро-коричневого оттенка. Изменение цвета каменной соли объясняется выделением внутри нее металлического натрия.

Однако, все описанные действия, оказываемые быстрыми электронами на атомы, сводятся к различным изменениям, происходящим в их электронных оболочках, нас же интересует действие быстрых частиц на ядро. В этом направлении и продолжались опыты с импульсными трубками. В первую очередь необходимо было установить, какую энергию в действительности приобретают электроны в разрядной трубке.

Для этой цели вместо пластинки с окошком, которой закрывалась нижняя часть трубки в описанных выше опытах, устанавливался приборчик, схема которого представлена на рис 80. Толстенная плоская латунная коробка *A*, соединенная с разрядной трубкой флянцем, сообщалась с внутренностью ее трубочки *B*, в которой были установлены две металлических пробочки *a* и *a'* с просверленным вдоль оси узким каналом. На дне коробки устанавливалась фотопластинка *P*. Узкий пучок электронов, выделенный каналами *a* и *a'*, попадал на фотопластинку, на которой после проявления обозначалось резко очерченное пятнышко в точке *b*. Для определения скорости электронов приборчик помещался между полюсами электромагнита (положение полюсов электромагнита на рисунке отмечено пунктирным кружком). В этом случае электроны, влетев в камеру *A*, отклонялись от своего первоначального направления, попадая (в зависимости от направления поля между полюсами магнита) либо в *b'*, либо в *c'*. Проявив такую пластинку, можно было, измерив на ней расстояние между неотклоненным пятнышком и отклоненным и зная величину магнитного поля, вычислить, что наиболее быстрые электроны вылетают из трубки, обладая энергией, соответствующей 1 350 000 вольт.

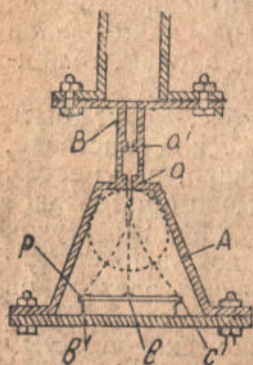


Рис. 80

После этого необходимо было перейти к ускорению положительных ионов и в первую очередь—ионов водорода (протонов).

Однако эта задача оказалась значительно более трудной. Был испробован целый ряд способов: в трубку вводили в небольших количествах чистый водород, светильный газ, состоящий из богатых водородом углеводородов, водяной пар, спирт и т. д. Тем не менее все эти попытки не дали достаточного эффекта. Число образующихся в трубке водородных ионов оказывалось малым, а при тех условиях, когда количество ионов достигало более или менее значительной величины, им не удавалось сообщить полную скорость, так как, вследствие малой мощности установки при интенсивном разряде в трубке продолжительность удара оказывалась слишком малой (конденсаторы импульсного генератора разряжались слишком быстро).

Это обстоятельство определило дальнейший ход работ. Бригада стала форсированным темпом разрабатывать другие методы ускорения ионов—метод постоянного напряжения и трансформатора Тесла, о чем сказано ниже; с другой стороны, было решено все же использовать опыт, полученный при работе с импульсным генератором в части конструирования высоковольтных конденсаторов, представляющих основное звено как в установках постоянного напряжения, так и в схемах Тесла.

Описанные выше опыты показали с достаточной очевидностью, что конденсаторы из стеклянных листов являются совершенно неудовлетворительными вследствие своей малой емкости, значительным утечкам, громоздкости и хрупкости. Поэтому от применения стеклянных конденсаторов пришлось отказаться и разработать новый, более компактный тип конденсатора.

После ряда предварительных опытов был выбран тип конденсатора с изоляцией из промасленной бумаги. Такой конденсатор представляет собой стопу бумажных листов, переслоенную через каждые полтора миллиметра листом металлической фольги. Весь конденсатор стянут болтами между солидными железными плитами и наглухо закрыт в железном бачке, залитом тщательно очищенным и просушенным трансформаторным маслом.

В изготовлении такого конденсатора самой сложной задачей является удаление из бумаги воды (которой даже в „сухой“ на вид бумаге содержится свыше 5%) и заполнение всех пор бумаги маслом. Для этой цели собранный в бачке конденсатор подвергается длительной (около 5 суток) сушке под непрерывной

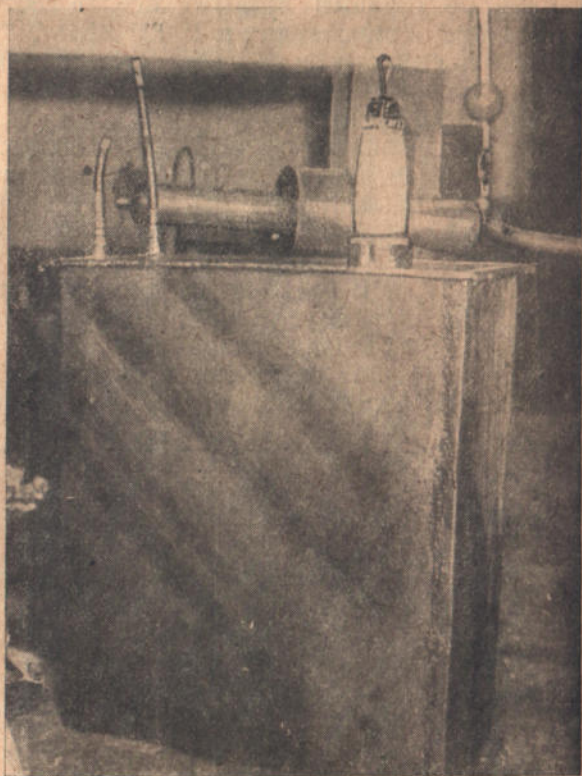


Рис. 81

откачкой с помощью мощного воздушного насоса, который высасывает испаряющуюся влагу. После того, как прекращается выделение воды, бачок заливается горячим маслом и выдерживается еще в течение двух суток при нагреве и откачке, для того чтобы масло полностью заполнило поры в бумаге. Готовый конденсатор представлен на рис 81. Такой конденсатор испытывается постоянным напряжением в 80 000 вольт и может работать при напряжениях в 45 000 вольт.

По своей емкости он соответствует 35 стеклянным листам, т. е. дает приблизительно двадцатипятикратный выигрыш места при монтаже установки.

В настоящее время в УФТИ производятся такого рода конденсаторы, предназначенные для сборки большой установки постоянного напряжения на 2,5 млн вольт и для применения в схемах с трансформатором Тесла, к описанию которых мы и переходим.

Работы с трансформатором Тесла

В главе шестой был описан ряд работ американских ученых, пытавшихся применить для исследования ядра заряженные частицы, ускоренные с помощью трансформатора Тесла. Там же говорилось о принципе действия этой высоковольтной установки.

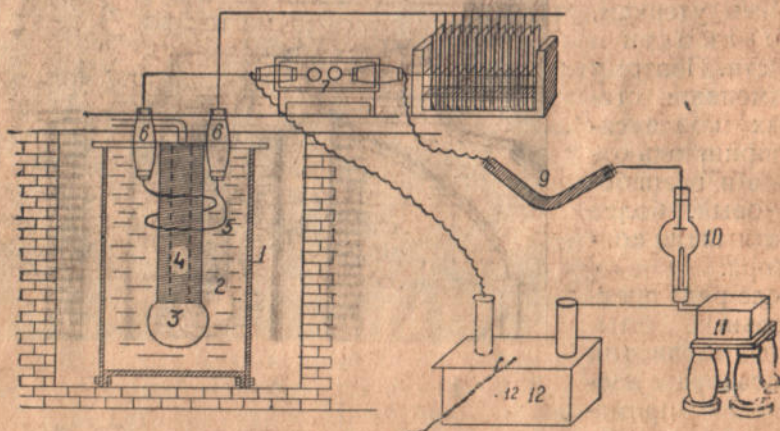


Рис. 82

Результаты американцев не особенно обнадеживали в успехе. Несмотря на то, что Брейту удалось получить на трансформаторе, погруженном в масло, напряжения около пяти миллионов вольт, — эти громадные напряжения не удавалось использовать, так как при построении соответствующей разрядной трубки встретился ряд технических трудностей. Однако бригада трансформатора Тесла не отступила перед этими трудностями, оценив его преимущества перед другими источниками напряжения (компактность, дешевизна, простота монтажа).

Построение самой высоковольтной установки не представило особых затруднений. После нескольких предварительных опытов было установлено, что основным затруднением при получении весьма высоких напряжений на трансформаторе Тесла является возникновение разряда между отдельными витками вторичной обмотки, между первичной обмоткой и вторичной, в результате которого не удавалось значительно повысить напряжение. Попытки заделать вторичную обмотку в твердую изолирующую оболочку, залив ее в парафин или какой-либо иной изолирующий сплав, не привели к цели. Относительно удачно

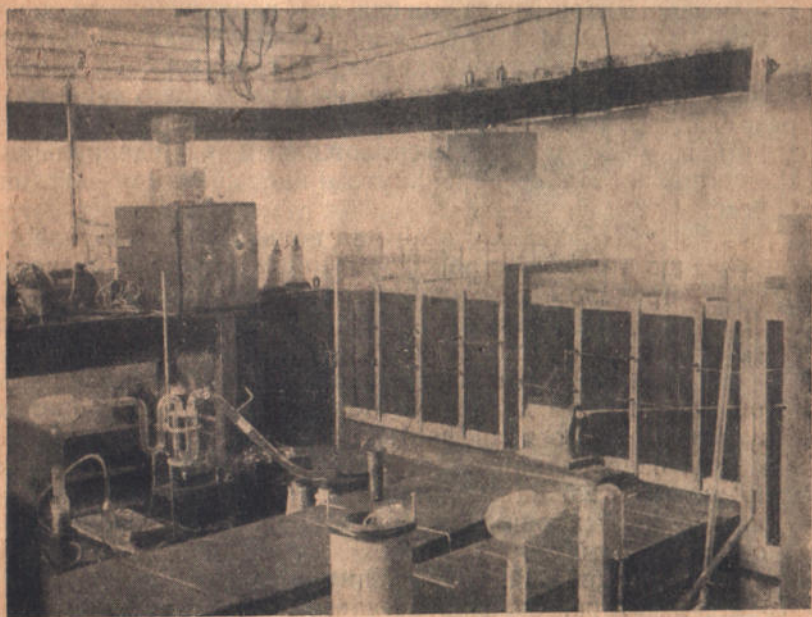


Рис. 83

вопрос с изоляцией вторичной обмотки удалось разрешить, построив трансформатор Тесла в масле.

Основные особенности конструкции трансформатора и размещение схемы показано на рис. 82 и 83.

В целях экономии места трансформатор был расположен в специальном колодце в полу подвального помещения. Весь трансформатор крепится на крышке цилиндрического изолирующего бака, заполненного тщательно просушенным трансформаторным маслом 2.

Вторичная обмотка трансформатора навита на изолирующем цилиндре 4 диаметром около 20 см и заканчивается металлическим шаром 3, для предотвращения преждевременного разряда с тонких проводников вторичной обмотки. Первичная обмотка 5, состоящая

всего из нескольких витков медной ленты, крепится на проходных изоляторах 6, укрепленных в крышке бака. В цепь первичной обмотки включен искровой разрядник 7, заключенный в войлоком коробочку, заглушающую треск разряда, и конденсаторная батарея 8. Параллельно искровому разряднику через водяное сопротивление 9 подключена питающая установка постоянного напряжения, состоящая из высоковольтного трансформатора 12 и кенотрона 10, катод которого накаливается изолированной от земли батареей аккумуляторов 11.

Перепробовав ряд типов вторичной обмотки, отличающихся своими размерами, сечением и изоляцией провода, работники группы трансформатора Тесла довели его напряжение до двух с половиной миллионов вольт. Дальнейшему повышению напряжения препятствует образование разряда снаружки бака, против конца вторичной обмотки. Некоторое представление о характере этого разряда дает рис. 84, на котором изображен бак с трансформатором и наблюдатель, расположенный на специальном обитом свинцом мостике, перекинутом над колодцем с трансформатором.

Напряжение в 2,5 млн вольт, которого удалось достигнуть с трансформатором Тесла, не является пределом. Дальнейшего повышения можно достигнуть, как показали описанные в главе шестой опыты американских ученых во главе с Брейтом, применяя в качестве изоляции трансформаторное масло при повышенном давлении. Можно ожидать также хороших результатов и от трансформатора Тесла в сжатом газе. Опыты в этом направлении ведутся в УФИ. Однако полученного напряжения в 2,5 млн вольт было вполне достаточно для начала опытов по ускорению ионов в разрядных трубках, питаемых от трансформатора Тесла.

Построение разрядной трубки, питаемой от высокочастотного трансформатора, оказалось чрезвычайно трудным; если число трубок различных конструкций, которые были испытаны на работе от импульсного генератора, исчисляется примерно двумя десятками, то число трубок для трансформатора Тесла превысило 100. Основным затруднением при построении этих трубок является необходимость придать трубке возможно большую компактность — требование, которое не предъявлялось к импульсным трубкам; далее — к высокочастотным трубкам ставились значительно более высокие требования по отношению к достигаемому в них разрежению, ибо мощность, выделяемая при работе трансформатора Тесла, значительно меньше, чем мощность в разряде импульсного генератора.

Уже на основании опытов американцев можно было думать, что наиболее трудной задачей является создание равномерного распределения потенциала вдоль трубки при ее работе. — задача, которую они тщетно пытались разрешить для трубки, распо-

женной вве трансформатора. Эта проблема сильно упрощается для трубки, расположенной внутри вторичной обмотки трансформатора, и этот тип и был принят за основу при разработке конструкций соответствующих трубок в УФТИ.

Объем книжки, к сожалению, не позволяет остановиться на описании конструкций всех типов трубок, испытанных на работе от трансформатора Тесла. Путь, пройденный в этом направлении работниками УФТИ, был очень „тернистым“. В каждую трубку было вложено громадное количество изобретательности и труда, а в большинстве случаев эти трубки гибли при первом испытании. В течение ничтожных долей секунды гибли результаты многих дней упорной и кропотливой работы. Однако они пропадали не безрезультатно, каждая новая конструкция приобщала крупицу опыта, и следующая трубка была совершеннее предыдущей.

В результате упорной систематической работы к осени 1932 г. была создана трубка, систематически выдерживавшая напряжения до 1,7 млн вольт, с помощью которой удалось наблюдать искусственное расщепление ядер при протонной бомбардировке.

Основные
Трубки, питаемые трансформатором Тесла

типы конструкций трубок,
испробованные



Рис. 84

на работе от трансформатора Тесла, представлены на рис. 85-а, 85-б и 85-в. В основе их лежит общая идея: трубка должна находиться *внутри* трансформатора. Это требование было выдержано во всех без исключения испробованных конструкциях и является основным отличием от трубок, применявшихся без особого успеха Брейтом и другими (см. главу шестую). Размещение трубки внутри трансформатора, наряду со значительным выигрышем в компактности установки, имеет еще следующее преимущество: распределение потенциала вдоль трубки задается принудительно, благодаря чему ослабляется возможность местных перенапряжений, разрядов вдоль трубки снаружи и изнутри, пробоев стенок и т. д.

Первоначальная конструкция трубок, схематически изображенная на рис. 85-а, представляет собой тонкостенный стеклян-

ный цилиндрический сосуд, на который непосредственно навивается вторичная обмотка трансформатора. Внутрь трубки, на расстоянии в 5-10 см друг от друга вставляются пружинящие кольца из никелевой жести. Эти кольца непременно должны быть разрезаны, в противном случае они будут представлять собой короткозамкнутые витки, помещенные в магнитное поле трансформатора, в них будет бесполезно затрачиваться подведенная в первичную обмотку трансформатора энергия, что вызовет нагревание и не даст возможности повысить напряжение на вторичной обмотке. Кольца через впаив в стенке трубки присоединяются к соответственным точкам вторичной обмотки, концы которой присоединены к электродам, впаянным по концам трубки.

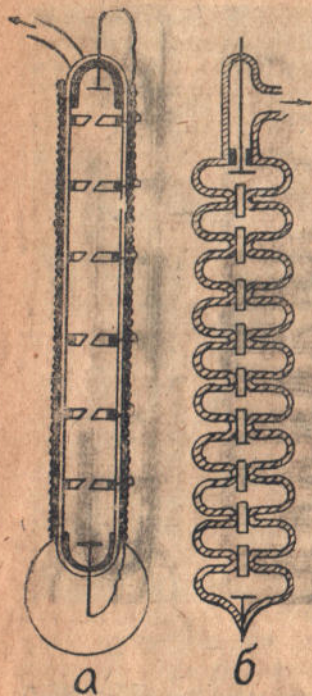


Рис. 85-а

Рис. 85-б

Назначение колец сводилось к созданию равномерного падения потенциала внутри трубки. Однако, несмотря на наличие указанных колец, в этой конструкции трубки избежать пробоя стенок не удалось. Накопляющиеся на внутренней поверхности стекла заряды создают значительную разность потенциалов на стеклянной стенке, вследствие которой и происходит ее пробой.

С целью предотвратить возможность такого пробоя была создана „ребристая трубка“, схематический разрез которой представлен на рис. 85-б. Такая трубка представляет собой ряд чередующихся с перетяжками, внутри которых по оси трубки устанавливались небольшие никелевые цилиндрики. Благодаря указанной форме попадание зарядов на внутренние стенки трубки сильно затруднено. Вторичная обмотка трансформатора навивается не на самую трубку,

а на изолирующий цилиндр, окружающий трубку, на некотором расстоянии от ее поверхности. Изготовление такого прибора требует высокой стеклодувной техники.

Большинство трубок этого типа разрушалось действием атмосферного давления, так как сопротивляемость трубки такой формы внешнему давлению значительно меньше, чем цилиндрической или шарообразной.

Однако и те трубки, которые не были раздавлены при откачке, не дали хороших результатов при испытании на трансформаторе. Вместе с тем ребристая трубка послужила переходом к той конструкции, которая, наконец, привела к положительным

результатам. Схематически эта разрядная трубка представлена на рис. 85-в. Отличительной ее чертой является то, что стеклянный сосуд не представляет собой одного целого, а собран из отдельных цилиндрических элементов. Большую помощь в изготовлении указанного прибора оказал Мерефьянский стекольный завод, на котором были изготовлены секции разрядной трубки из специального стекла „пайрекс“, отличающегося прекрасными изоляционными свойствами и не лопающегося даже при очень резких изменениях температуры. Отдельные секции склеивались между собой специальным клеем составом, не растворяющимся в трансформаторном масле. В доньшках каждой из секций были отверстия, в которые при сборке трубки вставлялись никелевые цилиндрики, образующие канал, в котором ускорялись заряженные частицы. Таким образом, получалась толстостенная разрядная трубка, в которой было почти полностью предотвращено попадание заряженных частиц на внутреннюю стенку.

Вся трубка помещалась внутри вторичной обмотки трансформатора, в пространство, заполненное трансформаторным маслом. Одним концом трубка прочно приделывалась к массивной крышке, которой был прикрыт трансформатор, другой присоединялась к металлическому шару, которым, с целью устранения потерь на истечение (корону), заканчивался конец вторичной обмотки трансформатора. Рядом испытаний было установлено, что эта конструкция трубки является весьма удачной.

Действительно, при достаточно тщательной сборке и хорошем качестве стеклянных элементов такого рода трубка выдерживает без пробоя стенок напряжения до 1,7 млн вольт.

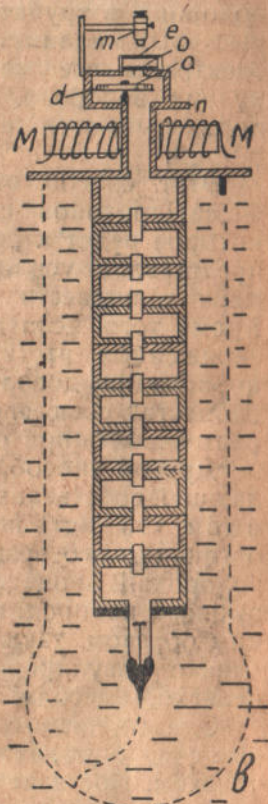


Рис. 85-в

После предварительных испытаний, установивших пригодность данной конструкции трубки, можно было перейти и к опытам по исследованию ядер ударами ускоренных в этой трубке протонов; однако для этого в первую очередь было необходимо создать в трубке эти протоны. Оказалось, что это дело нелегкое, и задачу получения

достаточно мощного протонного пучка в разрядной трубке, питаемой от трансформатора Тесла, нельзя считать окончательно разрешенной и по сегодняшний день.

Опыты по разрушению ядер с помощью трубки, питаемой от трансформатора Тесла

Однако небольшое количество заряженных атомов водорода (протонов) может быть получено в трубке двумя способами. Первый из них сводится к тому, что перед приложением напряжения тщательно откачанная трубка несколько раз „прополаскивается“ водородом, и в дальнейшем водород в нее непрерывно поступает через небольшое отверстие, регулируемое специальным вентилем. Благодаря энергичной откачке давление водорода в трубке очень мало (не превышает нескольких десятых миллиметра), но стремительно несущиеся вдоль трубки электроны все же время от времени сталкиваются с молекулами водорода, образуя протоны, которые, в свою очередь, подхватываются полем и ускоряются до значительных скоростей.

Этот способ отличается тем недостатком, что повышение числа протонов связано с увеличением давления водорода, которое ведет к „смягчению“ трубки. Смягчение же, которое представляет усиление разряда в трубке при данном напряжении, мешает подвести к трубке достаточно высокое напряжение. Кроме того, если давление водорода велико, то столкновения заряженных частиц с молекулами водорода в трубке будут происходить довольно часто, вследствие чего протоны не сумеют „донести“ свою скорость до исследуемого вещества, а будут ее растрчивать при столкновениях.

Другой способ, лишенный указанных недостатков, но обладающий собственными неприятными особенностями, заключается в том, что часть внутренней стенки трубки покрывается слоем органического вещества, содержащего значительное количество водорода. В процессе разряда электроны бомбардируют этот слой, выбивая водород, который связан в органические молекулы. Таким образом, также удастся получить в трубке пучок протонов, однако регулировать количество протонов при этом способе нелегко, благодаря чему трубка работает несколько капризно.

Однако, несмотря на это, опыты по дезинтеграции, поставленные с трубкой, питаемой от трансформатора Тесла, увенчались успехом. Поставлены они были следующим образом. Разрядная трубка описанного выше типа (рис. 85-в) заканчивалась металлической насадкой *н*. В эту насадку во время работы трубки влетали попеременно быстрые протоны и электроны (протоны — когда „низ“ трубки положителен, электроны — в следующий полупериод, когда он становится отрицательным).

Так как исследованию подвергалось только действие положительных частиц, а электроны, вследствие вызываемых ими рентгеновых лучей, только мешали наблюдению, необходимо было как-нибудь „отфильтровать“ протоны от электронов. Такое фильтрование осуществлялось электромагнитом *ММ*, в поле которого легкие электроны загибались в сторону, в то время как более тяжелые протоны пролетали насадку почти без отклонения. Исследуемые вещества помещались на тончайших пла-

стинках слюды в прорезах диска d , на котором был прикреплен железный стерженек, благодаря чему диск можно было поворачивать снаружи трубки, пользуясь небольшим постоянным магнитом, и таким образом подставлять под протонный пучок различные вещества. Против исследуемого вещества в металлическом дне трубки было проделано окошко, заклеенное алюминиевой фольгой толщиной в одну сотую миллиметра. Бомбардирующие протоны через такую фольгу пройти не могут, энергия их для этого недостаточна. Над окошком, подобно тому как в опытах Кокрофта и Уолтона, был установлен экран e из сернистого цинка, способный давать сцинтилляции (вспышки) под действием ударов быстрых частиц. Наблюдение экрана велось через микроскоп m .

Когда к трубке было приложено напряжение около четырехсот тысяч вольт, а на пути протонов стоял тонкий слой соли лития — на экране одна за другой замигали яркие сцинтилляции. При выключении напряжения сцинтилляции пропадали. Их также не было заметно, когда, вместо лития, был подставлен под удары протонов тонкий слой меди. Несколько позже таким же образом удалось наблюдать разрушение ядер фтора.

Однако, несмотря на положительные результаты, полученные при бомбардировке легких элементов протонами, полученными в разрядной трубке, питаемой трансформатором Тесла, этот способ создания высоких напряжений, равно как и импульсный генератор, вряд ли можно считать удобным для работы с положительными ионами. Громадным преимуществом этого метода является сравнительно легкая возможность получения высоких напряжений, наряду с этим он обладает и очень важным недостатком: высокое напряжение создается на очень малый промежуток времени.

Опыты Кокрофта и других исследователей, о которых говорилось в предыдущей главе, показали, что из сотен миллионов падающих на исследуемый материал протонов только единичные протоны „добираются“ до ядра, вызывая искусственное его расщепление, а громадное большинство теряет свою энергию в электронных оболочках атомов. Между тем наблюдать явления искусственного расщепления ядер протонами можно только в том случае, когда на исследуемое вещество эти протоны падают в достаточном количестве.

Импульсный генератор и трансформатор Тесла работают кратковременными толчками длительностью в миллионные или в лучшем случае в соты тысячные доли секунды. Чтобы за этот промежуток заметить явления искусственного расщепления, необходимо создать необычайно мощный пучок протонов в трубке, что представляет громадные технические трудности. И в этом отношении неизмеримо легче работать с трубками, питаемыми источником постоянного напряжения.

В самом деле, имея в своем распоряжении промежуток вре-

мени, измеряемый минутами вместо сотысячных долей секунды, мы можем довольствоваться протонными пучками в миллионы раз менее интенсивными, чем при импульсных методах. В тех же случаях, когда вопрос о количестве частиц, т. е. интенсивности бомбардировки, исследуемого вещества играет меньшую роль, а главный интерес представляет скорость (или, лучше сказать, энергия) падающих снарядов, трансформатор Тесла имеет несомненные преимущества перед установкой постоянного напряжения, так как с его помощью высокие напряжения порядка нескольких миллионов вольт могут быть получены на довольно компактной и не очень дорогой установке.

Таким образом, основная область дальнейших применений трансформатора Тесла для решения проблем ядерной физики это исследования, связанные с поглощением „искусственных γ -лучей“, испускаемых при торможении электронов, ускоренных в разрядной трубке; задачи же, связанные с расщеплением ядер ударами положительных частиц, требуют для своего решения разработки источников *постоянного* высокого напряжения и соответствующих разрядных трубок.

Высоковольтная бригада УФТИ поставила в центре своего внимания работу с источниками постоянного напряжения только после длительных исследований импульсного генератора, который казался наиболее удачным источником до работы Кокрофта и Уолтона. После этой работы (май 1932 г.) стало ясно, что необходимым условием экспериментов с положительными ионами является *большое количество* ионов, падающих на исследуемое вещество, и потому импульсные источники напряжения были признаны мало эффективными.

Начав в июне 1932 г. работу с источниками постоянного напряжения, работники УФТИ к началу октября располагали уже установкой постоянного напряжения на 350 000 вольт и соответствующей разрядной трубкой, в которой 11 октября (впервые в СССР) было наблюдено искусственное расщепление ядер лития.¹ В виду того, что генератор и трубка в осьовных чертах повторяют установку Кокрофта, подробно описанную в предыдущей главе (за исключением разве конструкции конденсаторов, которые были изготовлены „домашним способом“ из толстостенных стеклянных банок), мы здесь не будем давать описания установки, ограничившись фотографией трубки (рис. 86).

Эта трубка, как и дальнейшие конструкции, рассчитанные на более высокие напряжения, была осуществлена из толстостенных стеклянных цилиндров, изготовленных специально для этой цели стекольным заводом в Мерефе. Принципы, положенные в основу конструкции трубки Кокрофта (подразделение на камеры, отделенные металлическими экранами, поддерживаемыми

¹ Описанные выше опыты с разрушением ядер на трубке, питаемой трансформатором Тесла, были выполнены несколько позже.

при определенном потенциале, вспомогательная разрядная трубка наверху, служащая источником водородных ионов, металлические цилиндры с закругленными краями, расположенные по оси трубки и предохраняющие стеклянные стенки от зарядки вследствие прилипания электронов и ионов), обеспечили нормальную работу разрядной трубки при напряжениях до 350 000 вольт.

На этой трубке был проведен ряд опытов по расщеплению ядер лития, результаты которых находятся в полном согласии с описанными в предыдущей главе опытами Кокрофта и Уолтона.

Однако для дальнейших опытов не только с более тяжелыми элементами, но и с легко расщепляющимися ядрами (литий, фтор, бор, алюминий и другие), необходимо было перейти к большим напряжениям. И здесь в первую очередь встал вопрос об источнике высокого напряжения, который был

удачно разрешен работниками УФТИ, создавшими новый тип высоковольтной установки постоянного напряжения, обладающий большими преимуществами перед всеми применявшимися схемами.

Постоянное напряжение для целей ядерных исследований обладает значительными преимуществами по сравнению с напряжениями высокочастотными и импульсными. Однако осуществление установки на постоянное напряжение порядка миллиона или больше вольт встречает значительные трудности, которые отсутствуют в случае трансформаторов Тесла и импульсных генераторов.



Рис. 86

Высоковольтная установка постоянного напряжения

исследований обладает значительными преимуществами по сравнению с напряжениями высокочастотными и импульсными. Однако осуществление установки на постоянное напряжение порядка миллиона или больше вольт встречает значительные трудности, которые отсутствуют в случае трансформаторов Тесла и импульсных генераторов.

Дело в том, что единственным технически разработанным методом создания высоких постоянных напряжений при достаточно большой мощности является выпрямление кенотронами высокого напряжения, полученного на обычном трансформаторе технического типа (с железом). Однако непосредственное выпрямление кенотронами возможно лишь для напряжений не превышающих 200 000 вольт (предельное рабочее напряжение

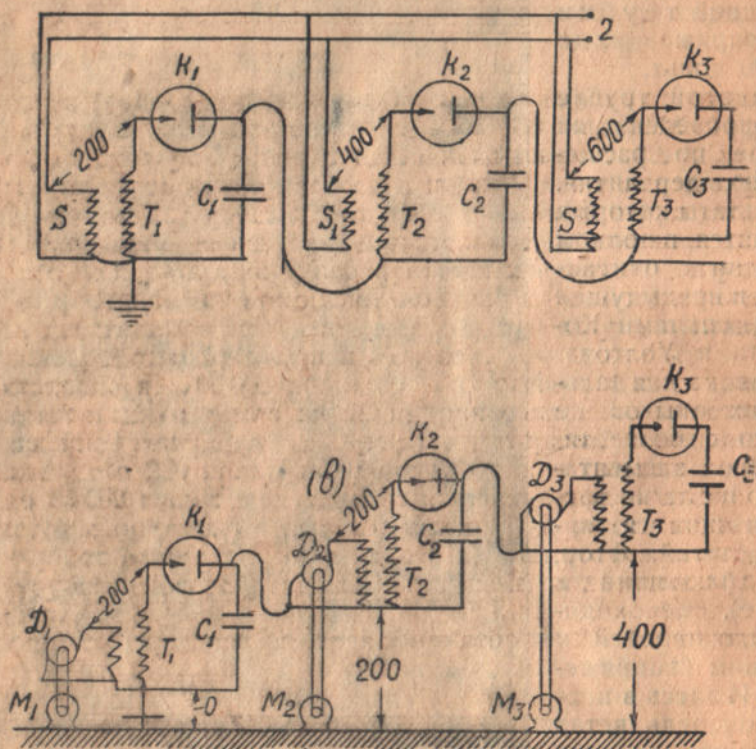


Рис. 87

для кенотронов), вследствие чего при построении установок для более высоких постоянных напряжений идут обходным путем, прибегая к конденсаторно-вентильным схемам, подобным, скажем, схеме Кокрофта, описанной в предыдущей главе. Эти схемы, однако, обладают тем существенным недостатком, что в них наряду с выигрышем в напряжении не возрастает мощность, вследствие чего на практике очень редко применяются схемы, на которых осуществляется увеличение исходного высокого напряжения более чем в 2 раза, т. е. практически не выше 350 000—400 000 вольт).

Разработанная в УФИИ установка лишена этого недостатка; напротив, добавление к ней каждого нового звена вызывает

приращение мощности всей установки, что является совершенно необходимым в связи с увеличением всевозможных родов утечек, резко увеличивающихся при переходе к все более и более высоким напряжениям. Идея ее чрезвычайно проста и основана на следующих соображениях. Так как конструкция существующих кенотронов не позволяет с помощью одного трансформатора и кенотрона получить напряжение выше 200 000 вольт, то естественно для получения более высоких напряжений пытаться соединить последовательно ряд ячеек, из которых каждая представляет выпрямительную установку на 200 000 вольт.

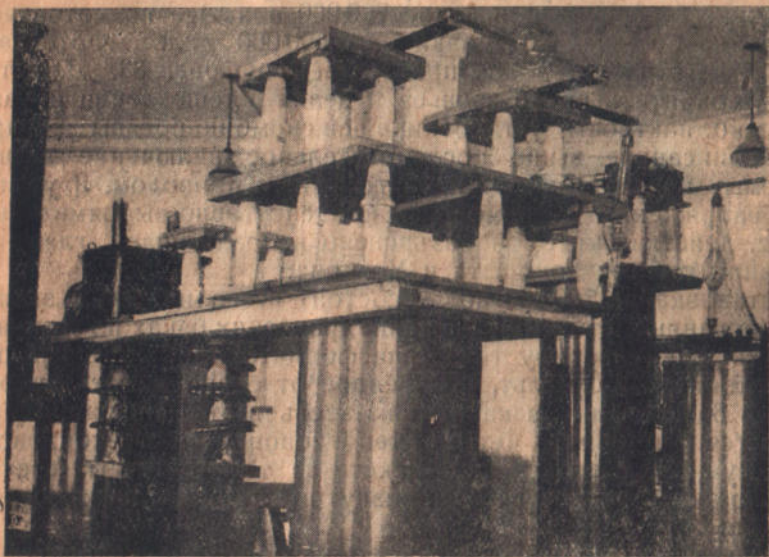


Рис. 88

Однако такое решение наталкивается на одно весьма серьезное препятствие, смысл которого очевиден из рис. 87. Если первичные обмотки высок вольтных трансформаторов во всех звеньях питать от сети переменного тока, то от звена к звену будет расти напряжение между первичной и вторичной обмоткой, достигая в первом звене 200 000 вольт, во втором 400 000 и т. д. Это обстоятельство, казалось бы, сводит на-нет преимущества схемы с последовательным соединением, так как изоляция обмоток трансформатора друг от друга уже во втором звене должна быть чрезвычайно громоздкой и дорогой, а, скажем, в четвертом или пятом звене становится технически неосуществимой.

Однако из этого затруднения был найден простой выход. Вместо того, чтобы питать первичные обмотки трансформатора от сети, можно каждое из звеньев установки изолировать от

земли достаточно высокими изолирующими подставками, на которых установить специальные машины переменного тока, питающие трансформаторы, и приводить их в движение с помощью достаточно длинных ремней от моторов, установленных на земле.

В такой установке к изоляции трансформаторов не предъявляется никаких особых требований, а все напряжение переносится на изолирующий привод от моторов к генераторам, осуществление которого не встречает серьезных технических трудностей.

В УФТИ по этому принципу уже осуществлена небольшая установка (рабочее напряжение 700 000 вольт) и готовится постройка большей установки на 2 500 000 вольт. Фотография первой из этих установок представлена на рис. 88. Для того, чтобы сократить число звеньев в целях удешевления и увеличения компактности установки, в ней скомбинированы два принципа: описанное выше последовательное включение звеньев, питаемых генераторами с изолированным приводом, и умножение напряжения с помощью конденсаторно-выпрямительной схемы, действие которой разъяснено в предыдущей главе, при описании работы Кокрофта и Уолтона.

Установка на 700 000 вольт состоит всего из двух звеньев, изолированных от земли на цилиндрических баках из гетинакса. Напряжение генерируется трансформаторами, повышающими напряжение в 220 вольт, полученное от специальных генераторов, до 85 000 вольт: в каждом из звеньев это напряжение учетверяется с помощью четырех кенотронов и шести конденсаторов, осуществленных в виде пакета из толстостенных стеклянных трубок, посеребренных изнутри и оклеенных фольгой снаружи.

Мощность каждого из трансформаторов 2,5 киловатта, так что вся установка дает 5 киловатт. Установка на 2,5 млн вольт, которая будет собрана из 8 звеньев, будет, следовательно, обладать мощностью в 20 киловатт.

Существлены две разрядные трубки для опытов на этой установке. Первая в общих чертах по типу Кокрофта и Уолтона, описанному в предыдущей главе. На конструкции ее мы поэтому здесь не останавливаемся, ограничившись ее фотографией, приведенной на рис. 89; другая имеет несколько отличную от нее конструкцию и предназначена для опытов с нейтронами. Общий вид этой трубки представлен на рис. 90, а схематический разрез — на рис. 91.

Так же, как и первая, она состоит из трех толстостенных стеклянных цилиндров *a* диаметром около 25 см, изготовленных из специального нетрескающегося стекла „пайрекс“ на Мерефьянском стекольном заводе, помощь которого в изготовлении стеклянных частей для всевозможных разрядных трубок оказа-

лась для УФИ в высшей степени ценной. Эти цилиндры вставлены в круговые канавки solidных железных дисков b_1 и b_2 , представляющих опору для внутренних металлических частей трубки $g_1—g_5$, которые в этой конструкции весьма solidны и обладают весом в несколько десятков килограмм. Сверху и снизу трубка заканчивается железными

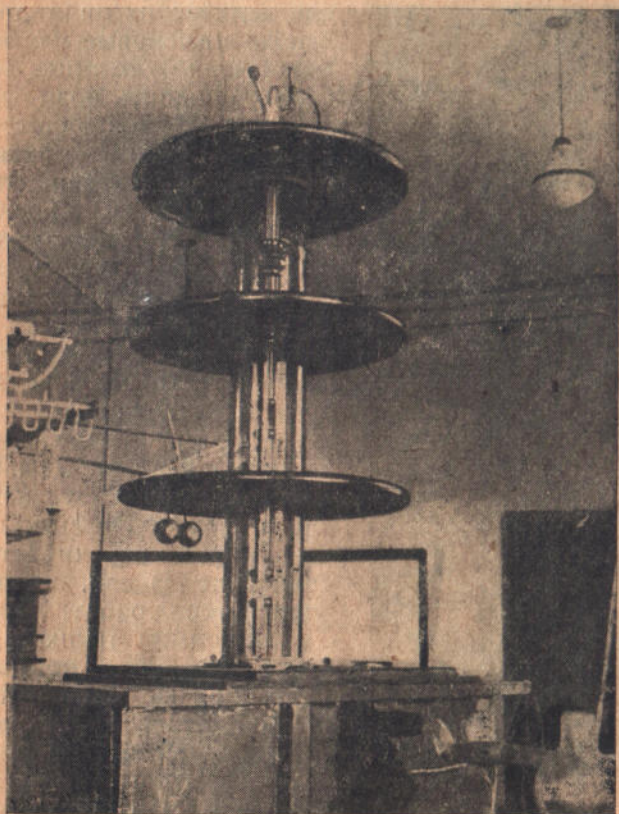


Рис. 89

плитами v и z . Уплотнение в соединениях железных дисков со стеклянными цилиндрами достигается путем заполнения канавки диска пластилином — пластичной массой, применяемой для лепки. На дисках b_1 , b_2 и v укреплены охранные экраны $e_1—e_3$, создающие вокруг трубки однородное электрическое поле. Длина главной части трубки (от z до v) достигает двух метров. Узкий канал $ж$ отделяет от главной части трубки вспомогательную трубку $л$. В ней с помощью разряда между электродами $ж$ и $з$ создаются положительные ионы гелия, которые, попадая внутрь большой трубки, ускоряются в ней и бом-

бардируют экран *o*, расположенный в специальном отростке нижнего диска *z*. Во вспомогательную трубочку *л* из резервуара квсе время просачивается через вентиль *и* гелий, благодаря чему в ней поддерживается давление, достаточное для интенсивного разряда.

Таким образом, эта разрядная трубка по принципу своего действия сходна с трубкой Кокрофта и Уолтона, отличаясь от нее конструкцией внутренних металлических цилиндров. В ней добавлены новые части g_2 и g_5 , назначение которых — еще более уменьшить возможность попадания зарядов на стеклянные стенки трубки и тем самым предохранить последние от пробоя.

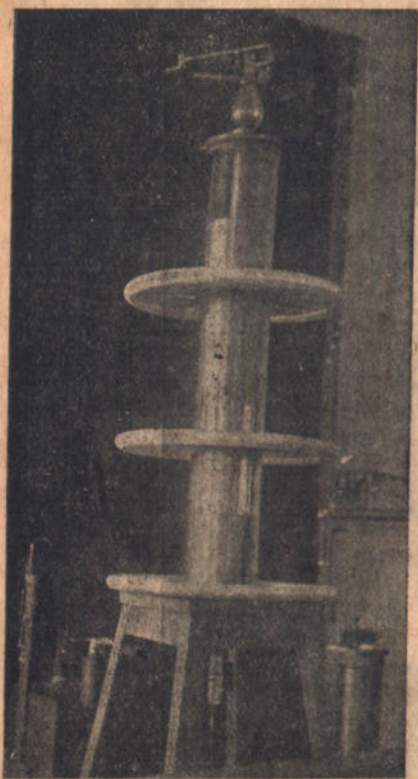


Рис. 90

Описанные типы высоковольтных установок и разрядных трубок, осуществленных в УФТИ, представляют уже достаточную базу для проведения ряда ядерных исследований.

Однако, прежде чем перейти к описанию тех путей, по которым предполагается развивать исследовательскую работу, необходимо перечислить те технические задачи, которые еще стоят перед работниками УФТИ.

Одной из таких задач является дальнейшее повышение напряжения на испытательных установках и трубках, доведение напряжения трансформатора Тесла и соответствующих трубок до трех, а постоянного напряжения до двух миллионов вольт,

которое, судя по данным Таранта, Грея и некоторых других исследователей, необходимо для исследования действия на ядра γ -лучей, для расщепления ударом протонов и „искусственных α -частиц“ ядер элементов со значительным атомным весом, а также для работы с легкими элементами, так как число сопровождающихся расщеплениями попаданий протонов в ядра резко возрастает с увеличением скорости падающих протонов.

Решение перечисленных задач потребует для своего осуществления возведения грандиозных установок, для которых размеры имеющихся в УФТИ помещений недостаточны, в связи с

чем для ядерных работ строится отдельный корпус с грандиозным залом (кубатурой около 20 000 м³).

Однако наряду с работами по созданию более мощных источников быстрых частиц не менее важной является задача освоения имеющихся. Для полного развертывания исследовательской работы на имеющихся разрядных трубках необходимо разработать и освоить ряд экспериментальных приемов изучения процессов ядерного распада, к каковым в первую очередь относятся камеры Уильсона и счетчики частиц (см. главу четвертую). Разработанные до этого времени в УФТИ конструкции камер и счетчиков работают далеко не безукоризненно и требуют ряда дальнейших усовершенствований, которые должны быть закончены в течение ближайших месяцев.

Дальнейшая исследовательская работа УФТИ

В настоящее время ядерная бригада УФТИ ведет работу в следующих направлениях: 1) исследование процессов расщепления ядер быстрыми протонами, 2) получение нейтронов и изучение их действия на атомные ядра, 3) исследование

ядер путем воздействия на них быстрых электронов и γ -лучей и, наконец, 4) исследование недавно открытых „ядерных взрывов“, происходящих под действием проникающего излучения.

Первые две задачи будут решаться на установке постоянного напряжения на 700 000 вольт. Работа с протонами будет заключаться в систематическом изучении действия протонов, ускоренных в разрядной трубке, на ядра различных элементов. С помощью счетчиков, камеры Уильсона и метода сцинтилляций будет определяться число и физическая природа частиц, выбитых из ядер.

Измеряя их пробег в воздухе или твердых телах или загибая в магнитном поле, можно установить их энергию (скорость).

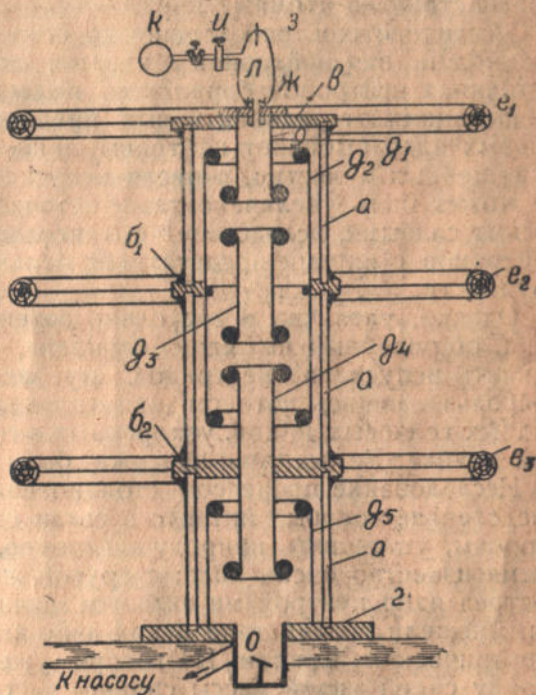


Рис. 91

Наиболее полные сведения о процессе расщепления ядер ударами протонов можно получить, засняв в камере Уильсона не только пути выбитых из ядер частиц, но и самый процесс расщепления, что, однако, представляет некоторые, правда, не непреодолимые технические трудности.

Исследование ядер нейтронами, в сущности, распадается на две задачи:

1) получение мощного пучка нейтронов и 2) изучение его воздействия на атомные ядра.

Исследователи, работавшие до сего времени над изучением взаимодействия нейтронов с ядрами, пользовались в качестве источника нейтронов бериллием, подвергнутым бомбардировке α -частицами от радиоактивных препаратов. Так как из бериллиевых ядер выбивает нейтроны лишь ничтожная часть всех испущенных α -частиц, а число испускаемых препаратом частиц не может быть увеличено, такие источники нейтронов являются весьма слабыми, вследствие чего исследование взаимодействий нейтронов с ядрами представляет большие экспериментальные трудности.

Однако, увеличив в несколько сотен тысяч раз поток α -частиц, обрушенный на ядра бериллия, можно соответственно усилить испускание нейтронов. Эту задачу можно разрешить, воспользовавшись потоком „искусственных α -частиц“—двухзарядных гелиевых ионов, ускоренных в соответствующей разрядной трубке. Ее конструкция уже была описана (рис. 90 и 91).

Исследование процессов столкновения нейтронов с ядрами представляет особый интерес в связи с возможностью, с одной стороны, установить природу нейтронов, о которой в настоящее время известно очень мало; с другой же стороны потому, что обстрел ядер нейтронами является значительно более эффективным, нежели воздействие каких-либо иных частиц, обладающих электрическим зарядом. Не говоря уже о частицах, которые в виду своей малой массы сильно рассеиваются электронными оболочками атомов, даже α -частицы и протоны в очень редких случаях оказываются в состоянии подойти настолько близко к ядру, чтобы вызвать его расщепление, так как положительный заряд ядра создает вокруг него „потенциальный барьер“—область, почти непроходимую для частиц с положительным зарядом. Для нейтрона, лишённого заряда, этот потенциальный барьер отсутствует, благодаря чему попадание нейтрона в ядро становится весьма возможным.

Нейтроны, пролетая сквозь строй атомов, почти „не чувствуют“ их присутствия, почти не расходуют своей энергии и, только подойдя на очень малое расстояние к ядру, вступают с ним в какое-то взаимодействие (природа которого еще не выяснена), очень часто приводящее к расщеплению ядер. В то время как из миллиона α -частиц или миллиарда протонов только несколько удается вызвать расщепление ядер, при бом-

бардировке нейтронами (как показали недавно опубликованные опыты ряда иностранных ученых) расщепление ядер производят не менее одной двадцатой части всех падающих частиц. Однако то обстоятельство, что нейтроны взаимодействуют только на очень малых расстояниях и в силу этого летящий нейтрон почти не оставляет на своем пути ионов, делает невозможным наблюдение „следов нейтронов“ в камере Уильсона, их непосредственный счет с помощью счетчиков или по методу сцинтилляций. Указанным способом можно открыть только ядра, приведенные в движение ударом нейтрона, или следы ядерной катастрофы—расщепления ядра при столкновении с нейтронами. Это несколько затрудняет эксперименты с нейтронами по сравнению с соответствующими опытами с α - и H -частицами. Однако интерес „нейтронных“ исследований настолько велик, что указанные трудности отнюдь не обескураживают исследователей, работающих в этой области.

Изучение ядер с помощью искусственных β - и γ -лучей будет вестись на трубке, питаемой трансформатором Тесла. За последние годы был проделан ряд исследований, имевших целью установить взаимодействие γ -лучей с ядрами. Эти опыты показали, что γ -лучи не особенно большой энергии (не превышающей полутора миллионов вольт) воздействуют преимущественно на электронные оболочки атомов, что с точки зрения исследования ядерных свойств не представляет особенного интереса. Однако при прохождении через некоторые вещества γ -лучей с энергией около двух миллионов вольт (такие γ -лучи испускаются при распаде ядер радиоактивного элемента тория C) наблюдались отступления от обычных законов рассеяния γ -лучей, которые, как видно, должны быть приписаны воздействию этих лучей на ядра. Провести сколько-нибудь точные исследования с γ -лучами, испускаемыми радиоактивными препаратами, крайне трудно, в связи с чрезвычайно малой их интенсивностью.

Искусственные γ -лучи, испускаемые при торможении электронов, ускоренных в разрядной трубке, обладают неизмеримо большей интенсивностью, чем γ -излучение радиоактивных препаратов; однако, интересных результатов можно ожидать от опытов с γ -лучами от электронов, ускоренных напряжением не менее чем в 2 млн вольт. Поэтому доведение рабочего напряжения трубок на трансформаторе Тесла до этого значения—очередная задача работников ядерной бригады, и разрешение ее позволит перейти к исследованию действия γ -лучей на ядра.

Что касается исследования ядер с помощью быстрых электронов (искусственные β -лучи), то здесь встречается одна принципиальная трудность. Проходя через материю, быстрые электроны теряют свою скорость, что сопровождается испусканием энергии в виде электромагнитных волн тем большей частоты, чем больше скорость электронов. Электроны, прошед-

шие разность потенциалов в 1,5—2 млн вольт, будут испускать электромагнитные волны с очень короткой длиной волны (γ -лучи). Эти γ -лучи способны прямо или косвенно, создавая быстрые электроны путем вырыва их из электронных оболочек атомов, воздействовать на все приборы, применяемые при исследовании ядерных процессов (счетчики, камеры Уильсона и т. д.). Это действие будет препятствовать исследованию столкновений β -лучей с ядрами. Для исследования ядер бомбардировкой электронами необходима разработка каких-то новых экспериментальных методов, основанных на устранении мешающего действия γ -лучей.

Открытие ядерных взрывов и работы УФИ по их исследованию

На протяжении 1932 г., оказавшегося исключительно богатым открытиями в области физики атомного ядра, были сделаны ценные наблюдения неизвестных до сего времени явлений „ядерных взрывов“, сопровождающихся выделением громадного количества энергии и происходящих, повидимому, под влиянием космического или проникающего излучения, которое открыто свыше десяти лет тому назад, но физическая природа которого не выяснена до настоящего времени. В задачи этой книжки не входит рассмотрение всего довольно богатого материала, который известен по вопросу о космических лучах, поэтому мы можем ограничиться только указанием основных их свойств и методов наблюдения, что необходимо для понимания пути, который привел к открытию ядерных взрывов.

В атмосферном воздухе, состоящем преимущественно из молекул азота и кислорода, у поверхности земли происходит непрерывно образование некоторого количества ионов. Правда, это количество ионов крайне ничтожно (не превышает в среднем трех—четырех в кубическом сантиметре за секунду), но все же вполне достаточно для того, чтобы его заметить и даже измерить с довольно большой точностью.

Ряд исследований показал, что добрая половина этих ионов образуется под действием различных „земных“ причин и в первую очередь в результате ионизации, производимой излучениями радиоактивных элементов, которые в ничтожном количестве присутствуют почти во всех окружающих нас телах. Однако это действие не может быть причиной всей ионизации. Остальная ее часть совершенно не связана с поверхностью земли, что доказывается тем, что она сильно возрастает по мере подъема над земной поверхностью в верхние слои атмосферы и, наоборот, уменьшается при погружении прибора на дно глубоких водоемов или шахт. Эти опыты заставляют искать недостающую причину в излучении, которое доходит до поверхности земли из далекого межзвездного пространства.

Кое-что о свойствах этих лучей говорит уже тот факт, что они создают ионы и, следовательно, проходя в атмосфере, за-

трачивают значительное количество энергии. Учитывая то, что они проходят в достаточном количестве сквозь всю толщу атмосферы, необходимо допустить, что их первоначальная энергия огромна и превосходит энергию всех видов излучения которые были известны до сих пор. Остается открытым вопрос, являются ли космические лучи электромагнитными волнами (тогда они подобны γ -лучам, но только со значительно большей энергией) или они представляют поток элементарных заряженных частиц (электронов или протонов), несущихся с скоростями, соответствующими примерно нескольким миллиардам вольт. Наконец, принципиально не исключена возможность, что проникающие лучи это поток быстрых нейтронов. Ряд опытных данных говорит за то, что, во всяком случае, часть космического излучения представляет поток заряженных частиц. Все же вопрос об их природе нельзя считать окончательно решенным.

Четыре года тому назад немецкий ученый Штейнке установил, что время от времени в исследуемом объеме воздуха внезапно образуется большое количество ионов, намного превышающее то среднее количество в три-четыре иона в кубическом сантиметре, которое объясняется, на ряду с рядом причин земного происхождения, действием космических лучей. Продолжив свои опыты в соляной копи на глубине около полукилометра под землей, Штейнке показал, что образование лучших порций ионов связано с процессами, вызванными космическими лучами, так как оно наблюдалось только на поверхности земли и полностью исчезало при опускании в глубокую шахту. Ряд ученых пытался продолжить исследование этих явлений с помощью камеры Уильсона, которая, как известно, дает возможность изучать динамику процессов, связанных с образованием ионов; однако эти попытки нельзя признать особенно плодотворными.

В самом деле, открытое Штейнке явление происходит сравнительно редко (один раз за несколько минут), и камера Уильсона способна зафиксировать процесс только в том случае, когда он происходит в пределах одной сотой секунды до или после ее расширения. Поэтому, расширяя повторно камеру и производя фотографии полученных в ней путей, можно надеяться получить один удачный снимок на несколько десятков тысяч неудачных.

Блэккетту удалось выйти из этого затруднения путем соединения в одной установке камеры Уильсона с двумя счетчиками частиц. Установив камеру между двумя счетчиками, он сконструировал электромагнитный механизм, с помощью которого производилось расширение камеры только в тот момент, когда два счетчика фиксировали одновременно появление ионов, вызванных пролетевшей через них частицей. Если только через оба счетчика, практически одновременно зарегистрировавших пролет частиц, пролетела одна и та же частица, то она непре-

менно прошла и сквозь камеру Уильсона, и, следовательно, путь ее будет заснят.

С помощью этого устройства Блэккетту удалось довести процент удачных снимков до 75 и на ряде фотографий он обнаружил следы процесса, лежащего в основе явления Штейнке. На этих снимках виден не один путь частицы, производящей на своем пути ионы, а целый „ливень“ нескольких (иногда свыше двадцати) путей, большинство которых исходит из одной точки, лежащей неподалеку от камеры обычно в пределах пространства, занятого катушкой, которая создавала в камере Уильсона магнитное поле).

При своем полете в магнитном поле частицы должны отклоняться от прямолинейного пути. Сопоставляя величину отклонения частиц с числом ионов, создаваемых ими на своем пути, Блэккетт установил, что большинство заснятых путей принадлежит электронам, обладающим различной, но во всех случаях весьма значительной энергией, от нескольких миллионов вплоть до сотен миллионов вольт. Общую энергию всех частиц в таком расходящемся пучке Блэккетт оценивает примерно в миллиард вольт.

Такие значения энергий превосходят все то, что до сих пор было известно в области энергий при ядерных превращениях, и указывают на какое-то неизвестное до сих пор явление, вызванное, по видимому, воздействием на ядра космических лучей.

Наряду с чудовищными энергиями таких „взрывов“ из своих фотографий Блэккетт извлекает еще один не менее интересный факт. Дело в том, что пути частиц, которые засняты в камере Уильсона и которые по числу ионов, созданных на сантиметре пути, должны быть приписаны электронам, *отклоняются в магнитном поле частью в одну, часть в другую — противоположную — сторону*. Этот факт говорит за то, что пучок частиц, разлетающихся от места ядерного взрыва, на добрую треть состоит из частиц с массой электрона, но с положительным зарядом.¹

Таким образом, в этих явлениях встречается совершенно новый вид элементарных частиц — *положительные электроны, или позитроны*. Открытиям Андерсона и Блэккетта, подтвержденным работами ряда других исследователей, суждено сыграть исключительную роль в той переработке, которой должны подвергнуться представления о строении ядер, установившиеся в физике на основании всего предыдущего опыта. Однако для каких бы то ни было дальнейших построений совершенно необходимо накопление опытного материала относи-

¹ Пути „положительных“ электронов были замечены еще до Блэккетта американским физиком Андерсоном, но так как он работал с камерой Уильсона, не связанной со счетчиком, у него число путей было значительно меньшим.

тельно необычайных явлений, открытых в течение последнего года.

Поэтому-то явление ядерных взрывов—это новое направление, в котором разворачивается исследовательская работа ядерной бригады УФТИ. В отличие от остальных работ, это исследование не требует разрядных трубок и источников высокого напряжения и будет вестись с помощью счетчиков и камеры Уильсона в магнитном поле.

Заканчивая на этом описание основных направлений дальнейшей работы ядерных лабораторий УФТИ, нельзя не отметить, что в решение центральной проблемы современной физики научные лаборатории Союза уже включились, но до сих пор шли еще в основном путем копирования техники ведущих ядерных лабораторий Европы. Этап освоения техники ядерного исследования был пройден ударным темпом. Дальнейшая задача—развертывание творческой исследовательской работы в этой области—задача несравненно более трудная, но вместе с тем и более благодарная. И эта задача должна быть и будет нами разрешена.

О Г Л А В Л Е Н И Е

I. Значение проблемы ядра

	Стр.
Физики всего мира изучают строение ядра	3
Исследования атомного ядра в СССР	4
Открытие 1932 г.	4
Атом, его оболочка и ядро	5
Периферические свойства атомов	6
Возбуждение атомов	6
Ультрафиолетовые и рентгеновы лучи	7
Химические свойства атомов и ионы	8
„Ядерные“ свойства атома	10
Энергетический интерес проблемы ядра	13
Выделение энергии при радиоактивном распаде	14
Принцип эквивалентности массы и энергии	14
Энергия образования ядра гелия	15

II. Основные подступы к исследованию ядра

Протоны и электроны	16
Изотопы	16
Выбивание протонов из ядер	17
Атомный вес и атомный номер	17
Внутриядерные электроны	18
Загадки ядра	19
Основные направления исследования ядра	19
Оптические методы исследования ядра	20
Явление Зеемана	20
Молекулярные спектры	21
Взвешивание атомов и их осколков палету	23

III. Радиоактивные элементы и их превращения

Открытие Беккереля; α - и β -лучи	26
Радиоактивность	28
Кажущееся несохранение энергии	29
Радиоактивное равновесие	29
α -частицы	30
α - и β -распад	30
Время полураспада	31
Радиоактивные семейства	32
Семейство урана	32
Полоний	32
Радий С	34
Радиоактивные изотопы	34
Семейство тория	35
Не все ли вещества радиоактивны?	35
Что может дать исследование явлений радиоактивности	36
Применение к ядру волновой механики	36
Происхождение γ -лучей	39
Исследование длиннопребывающих α -частиц радия С и тория С	41
Тонкая структура α -лучей	41
Возбуждение ядра γ -лучами	43
α -частицы как орудие исследования ядер нерадиоактивных элементов	44

IV. Как видят невидимое

Размеры атомов	44
Спинциляция	45

Спинтарископ	46
Счет α -частиц	46
Пробег α -частиц	47
Прохождение α -частиц через атомы	48
Обнаружение путей α -частиц	50
Фотографическое действие α -частиц	50
Конденсация воды на ионах	50
Конденсация воды на путях α -частиц	52
Камера Уильсона	54
Автоматическая камера Шниу	55
Электрические счетчики	56
Ионизационная камера	56
Счетчики с усилением катодными лампами	57
Счетчик Гейгера	59
Способы изучения γ -лучей	62
Вторичные электроны	62

V. Ядро под обстрелом α -частиц

α -частица, как снаряд для исследования ядра	64
Закон Кулона	64
Полет α -частиц вблизи ядра	65
Способ изучения силового поля ядра с помощью α -частиц	66
Пути α -частиц и "вилки"	66
Распределение рассеянных α -частиц по углам	68
Опыты Чадвика по рассеянию α -частиц тяжелыми элементами	68
Рассеяние α -частиц ядрами легких элементов	69
Описание результатов исследования рассеяния α -частиц легкими ядрами	69
Свойства атомных ядер	70
Соединение ядер	71
Ионизирующие способности	71
Свойства H -частиц и их пробеги	73
Спинтарископ	73
Искусственное превращение элементов	75
Опыты Резерфорда	76
Опыты Резерфорда и Чадвика	79
Искусственное превращение других элементов	80
Наблюдения под углом к направлению α -частиц	80
Столкновение между кембриджской и венской школами	81
История расщепления атомных ядер	82
Опыты Блеккетта	83
Искусственное превращение азота в кислород	84
Выделение энергии при разложении азота	85
Опыты Резерфорда и Чадвика по искусственному расщеплению ядер	85
Изменения в свойствах четных и нечетных элементов	86
Опыты Астона о дефекте массы для легких элементов	87
История исследования искусственно о разрушения ядер	87
Недостаток опытов по искусственному разрушению ядер	88
История превращения элементов	89
Искусственное превращение руты в золото	90
Опыты Резерфорда и Беккера (γ -лучи из бериллия)	91
Опыты Резерфорда и Жолио	92
История превращения бериллия в литий	93
История превращения бериллия в бор	93

VI. Искусственные молнии и ионные пушки

Искусственные молнии	96
Ионные пушки	97
Задачи получения сверхбыстрых ионов	98

В погоне за грозами	99
Четыре основных направления в технике создания сверхвысоких напряжений	102
Переменное напряжение технической частоты. Трансформаторы с железом	103
Трансформаторы с маслом	103
Вывод высокого напряжения	103
Каскадное включение трансформаторов	104
Трулиности построения сверхвысоковольтной разрядной трубки	104
Преждевременный разряд	106
Принудительное распределение потенциала	107
Пробой стенок разрядных трубок	108
Перекрытие по внешней поверхности трубки	109
Трубка Лауритсена - Беннегта	110
Индукционная катушка, как источник напряжения для трубки	112
Индуктор на 900 000 вольт	113
Электронные и ионные трубки	114
Трубки Кулиджа на 900 000 вольт	115
Некоторые действия электронов на 900 000 вольт	116
Трансформатор Тесла	117
Технические трансформаторы Тесла	119
Трансформатор Брейта	119
Трубка Брейта	121
Импульсные генераторы	123
Опыт Браша и Ланге	125
Трубка Браша и Ланге	125
Метод последовательного ускорения ионов переменным полем	19
Установка Лауренса для тяжелых ионов	19
Установка Лауренса для легких ионов	20
Источники постоянного напряжения. Машина ван-Граафа	20
Установки постоянного напряжения с кенотронами	21
Конденсаторно-вентильные схемы умножения	23

VII. Ядра под обстрелом протонов

Опыт Кокрофта и Уолтона	26
Кенотрон Кокрофта и Уолтона	28
Трубка	29
Работа установки	29
Разрушение ядер лития	30
Толкование результатов бомбардировки лития	30
Разрушения ядер других элементов	31

VIII. Работа УФТИ в области исследования ядра

Постановка задачи и метод работы	137
Работа с импульсным генератором	157
Разрядные трубки	159
Блиновидная трубка	161
Опыты с импульсными трубками	164
Работы с трансформатором Тесла	168
Конструкция трубок, питаемых от трансформатора Тесла	170
Трубки, питаемые трансформатором Тесла	171
Опыты по разрушению ядер с помощью трубки, питаемой от трансформатора Тесла	173
Работы УФТИ с источниками постоянного напряжения	176
Высоковольтная установка постоянного напряжения	177
Разрядные трубки на 700 000 вольт	180
Разработка техники эксперимента	182
Дальнейшая исследовательская работа УФТИ	183
Открытие ядерных взрывов и работа УФТИ по их исследованию	186

192

Академическая
БИБЛИОТЕКА

